

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Aplicação de um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) na expansão da rede de distribuição de energia elétrica em Angola

António Moreira

Dissertação submetida ao Instituto Superior de Engenharia do Porto
para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Orientadora: Professora Doutora Maria Teresa Costa

Julho de 2013

RESUMO

Em Angola, apenas cerca de 30% da população tem acesso à energia elétrica, nível que decresce para valores inferiores a 10% em zonas rurais mais remotas. Este problema é agravado pelo facto de, na maioria dos casos, as infraestruturas existentes se encontrarem danificadas ou não acompanharem o desenvolvimento da região. Em particular na capital angolana, Luanda que, sendo a menor província de Angola, é a que regista atualmente a maior densidade populacional. Com uma população de cerca de 5 milhões de habitantes, não só há frequentemente problemas relacionados com a falha do fornecimento de energia elétrica como há ainda uma percentagem considerável de municípios onde a rede elétrica ainda nem sequer chegou.

O governo de Angola, no seu esforço de crescimento e aproveitamento das suas enormes potencialidades, definiu o setor energético como um dos fatores críticos para o desenvolvimento sustentável do país, tendo assumido que este é um dos eixos prioritários até 2016. Existem objetivos claros quanto à reabilitação e expansão das infraestruturas do setor elétrico, aumentando a capacidade instalada do país e criando uma rede nacional adequada, com o intuito não só de melhorar a qualidade e fiabilidade da rede já existente como de a aumentar.

Este trabalho de dissertação consistiu no levantamento de dados reais relativamente à rede de distribuição de energia elétrica de Luanda, na análise e planeamento do que é mais premente fazer relativamente à sua expansão, na escolha dos locais onde é viável localizar novas subestações, na modelação adequada do problema real e na proposta de uma solução ótima para a expansão da rede existente.

Depois de analisados diferentes modelos matemáticos aplicados ao problema de expansão de redes de distribuição de energia elétrica encontrados na literatura, optou-se por um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) que se mostrou adequado. Desenvolvido o modelo do problema, o mesmo foi resolvido por recurso a *software* de otimização Analytic Solver e CPLEX.

Como forma de validação dos resultados obtidos, foi implementada a solução de rede no simulador PowerWorld 8.0 OPF, *software* este que permite a simulação da operação do sistema de trânsito de potências.

ABSTRACT

In Angola, only about 30% of the population has access to electricity, a level that declines to 10% in remote rural areas. This problem is exacerbated by the fact that, in most cases, existing facilities are damaged or do not follow up the development of the region. Particularly in Luanda, the smallest province of Angola but whose population of about 5 million exceeds 20% of the current population of the country, there are often problems related to failure of electricity supply and, worse than that, there is still a considerable percentage of municipalities where electricity has not even reached.

The government of Angola, in its growth effort and taking advantage of its enormous potential, defined the energy sector as one of the critical factors for sustainable development of the country, having assumed that this is a priority axis until 2016. There are clear objectives regarding the rehabilitation and expansion of infrastructure in the electricity sector, increasing the installed capacity of the country and creating a proper national network, in order not only to improve the quality and reliability of the existing network but also to increase it.

The work in this dissertation consisted of data collection, regarding the electrical distribution network of Luanda, analysis and planning of what is considered to be urgent about its expansion, selection of locations where it is feasible to locate new substations, appropriate modeling of the real problem and a proposal for an optimal solution to expand the existing network.

After analyzing different mathematical models applied to the distribution expansion problem, we chose a model of mixed integer linear programming (MILP) that we considered adequate. After developing the model, it was solved by the use of optimization software Analytic Solver and CPLEX.

As a means of validation of the results obtained, the previous network solution has been implemented in the Simulator PowerWorld 8.0 OPF. This software allows you to simulate the operation of the system power flow.

AGRADECIMENTOS

Durante o período de desenvolvimento desta dissertação, foi importante poder contar com o apoio de familiares e amigos, aos quais gostaria de manifestar o meu agradecimento.

Agradeço também àqueles que colaboraram neste trabalho através da resposta aos vários pedidos de esclarecimento e disponibilização de documentação, cujo contributo foi importante.

Agradeço em especial à minha orientadora da presente dissertação, a Professora Doutora Maria Teresa do Valle Moura Costa pela sua total disponibilidade e incentivo manifestado desde o início. O seu apoio foi fundamental para a evolução deste trabalho e determinante para o meu conhecimento profissional e pessoal.

ÍNDICE

RESUMO	III
ABSTRACT	V
AGRADECIMENTOS	VII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XV
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	2
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO 2 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ANGOLA	5
2.1 DIAGNÓSTICO DO SETOR ELÉTRICO ANGOLANO	6
2.2 CONTEXTUALIZAÇÃO: A CIDADE DE LUANDA	12
2.2.1 Sistema elétrico de distribuição existente.....	13
2.2.2 Evolução da procura / oferta de energia	15
2.2.3 Planeamento da expansão da rede de distribuição.....	17
2.3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE EXPANSÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO.....	18
CAPÍTULO 3 PROBLEMA DE EXPANSÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO – REVISÃO DA LITERATURA.....	21
3.1 TRABALHOS PUBLICADOS SOBRE ANGOLA E PAÍSES AFINS	22
3.2 ABORDAGENS AO PROBLEMA DE EXPANSÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO.....	24
CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDO – CIDADE DE LUANDA.....	29
4.1 REDE EXISTENTE E PLANEAMENTO DA EXPANSÃO	29
4.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE EXPANSÃO COMO UM MODELO PLIM.....	33
4.2.1 Função objetivo.....	33
4.2.2 Restrições.....	37
4.3 FERRAMENTAS DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA	40

4.3.1 <i>Analytic Solver Platform</i>	40
4.3.2 <i>CPLEX</i>	42
CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	43
5.1 CASO DE ESTUDO	43
5.1.1 <i>Sistema de Teste</i>	46
5.1.2 <i>Análise de Resultados</i>	48
5.2. VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO ENCONTRADA	52
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	57
6.1 CONCLUSÕES	57
6.2 TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS	61
ANEXOS	65
ANEXO I	67
ANEXO II	71
ANEXO III	73
ANEXO IV	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção, transporte e distribuição energia elétrica	6
Figura 2 - Principais fontes de produção energia Angola.....	7
Figura 3 - Mapa Rede Elétrica Nacional Angola.....	9
Figura 4 - Entidades responsáveis pelo fornecimento de energia eléctrica em Angola	10
Figura 5 – Reparação rede baixa tensão danificada Luanda.....	11
Figura 7 - Comunicado EDEL.....	12
Figura 8 - Extrato do mapa de Luanda com Localização das Subestações em Estudo	14
Figura 9 - Paisagem Época Cacimbo Angola	16
Figura 10 - Barragem de Cabambe (Kuanza Norte).....	16
Figura 11 - Representação gráfica do défice energético de Luanda vs Estações do ano (dados de 2011).....	17
Figura 12 - Implantação das subestações e pontos de consumo existentes	30
Figura 13 - Pontos de consumo existentes e propostos, a alimentar	31
Figura 14 - Rede a implementar no <i>software</i>	32
Figura 15 - Analytic Solver Platform	41
Figura 16 - Software CPLEX	42
Figura 17 - Localização em mapa das subestações e PT's em exploração	44
Figura 18 - Localização em mapa das subestações e PT's em exploração e propostos	45
Figura 19 - Implementação <i>software</i> Analytic Solver Platform.....	47
Figura 20 - Resultados <i>software</i> Analytic Solver Platform.....	48
Figura 21 - Rede proposta antes da aplicação do <i>software</i>	49
Figura 22 - Resultado da rede (<i>software</i>)	50
Figura 23 - Rede resultante aplicação <i>software</i>	51
Figura 24 - Fluxograma procura solução ótima.....	53
Figura 25 - Implementação da rede em estudo no simulador <i>software PowerWorld</i>	54
Figura 26 - Implementação no PowerWorld da rede resultante do <i>software</i> otimização.....	55
Figura 27 - Seleção plataforma de otimização	67
Figura 28 - Painel de navegação Solver Analytic Platform.....	67
Figura 29 - Janela de opções botão restrições Analytic Solver Platform	68
Figura 30 - Aplicação do CPLEX à folha de cálculo	71
Figura 31 – Information Model CPLEX.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade instalada versus Capacidade potencial – dados de 2002.....	8
Tabela 2 - Capacidade instalada versus Capacidade potencial – dados de 2011.....	8
Tabela 3 - Valores cobrados vs faturados de energia elétrica (<i>fonte: EDEL</i>)	11
Tabela 4 - Lista de Subestações (SE) em Angola em Dezembro de 2012	13
Tabela 5 - Subestações em Luanda e sua caracterização.....	14
Tabela 6 - Variação do défice energético na Cidade Luanda ao longo ano 2011	15
Tabela 7 - Pontos de consumo e suas necessidades de potência	18
Tabela 8 - Comprimentos das linhas de transmissão de energia elétrica	32
Tabela 9 - Restrições de Potência.....	37
Tabela 10 - Restrições físicas e elétricas nas linhas	38
Tabela 11 - Restrições de trânsito de potência nas linhas	38
Tabela 12 - Restrições de potência novas linhas	38
Tabela 13 - Resultado pontos de consumo e suas necessidades de potência.....	51
Tabela 14 - Potência a disponibilizar por cada subestação.....	52

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

PLIM – Programação Linear Inteira Mista
MPLA – Movimento Popular de Libertação de Angola
UNITA – União Nacional para a Independência Total de Angola
FNLA – Frente Nacional de Libertação de Angola
ENE – Empresa Nacional de Eletricidade de Angola
EDEL – Empresa de Distribuição de Energia Elétrica
AID – Agência Internacional de Desenvolvimento

Ω^N – Conjunto circuitos novos
 Ω^{EN} – Conjunto circuitos existentes e novos
 C – Conjunto tipo condutores
 B – Conjunto barramentos sistema
 A^S – Conjunto subestações
 ij – Ligações entre o nó i e o nó j
 $\alpha_{ij,c}^L$ – Variável binária de decisão em investimento de circuitos de i para j , com condutor c
 $C_{ij,c}^L$ – Custo construção circuito de i para j , com condutor c
 α_i^S – Variável binária de decisão do investimento em subestações
 C_i^S – Custo construção subestação
 C_L^P – Custo com perdas de potência ativa circuito ij
 $R_{ij,c}^{EN}$ – Resistência do circuito existente ou novo ij , com condutor tipo c
 $(I_{ij,c}^{EN})^2$ – Corrente no circuito existente ou novo ij , com condutor tipo c
 V^{nom} – Tensão nominal
 I_i^S – Corrente na subestação i
 C_i^0 – Custo de operação da subestação i
 K – Custo de racionalização
 R_i – Racionalização no barramento i

Capítulo 1

Introdução

Em Angola, apenas cerca de 30% da população tem acesso à energia elétrica, sendo o problema agravado pelo facto de, na maioria dos casos, as infraestruturas existentes se encontrarem degradadas ou não acompanharem o desenvolvimento da região. Como tal, a rede energética é um dos mais importantes fatores críticos para o desenvolvimento sustentável de Angola. A confirmá-lo, recentemente, o ministro da energia e das águas de Angola deixou claro que a implementação e o desenvolvimento de projetos de expansão do sistema elétrico nacional, quer de capacidade de produção, quer da rede de distribuição associada, serão uma prioridade até 2016 [MINEA, 2012]. O objetivo é aumentar em cinco vezes a capacidade instalada do país, criando uma rede nacional adequada até essa data. O investimento deverá ser de 9 mil milhões de dólares para a instalação de capacidades de produção e de 7,5 mil milhões de dólares para o sistema de distribuição associado.

1.1 Motivação

Encontrando-se o autor desta dissertação a trabalhar em Angola desde 2012, rapidamente constatou a diversidade de áreas onde é imperativo investir para melhorar a qualidade de vida das populações. Sendo licenciado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia e encontrando-se a realizar o Mestrado na mesma área, foi natural a escolha do tema para a dissertação, dada a riqueza de recursos energéticos do país e a situação política atual, com as suas estratégias de desenvolvimento sustentável definidas como prioritárias.

Sendo o setor elétrico considerado um eixo prioritário, urge fazer algo quer ao nível da produção e transporte, quer ao nível da distribuição da energia elétrica. O motivo pelo qual foi escolhida a fase da distribuição prende-se com o facto de, embora escassos, terem sido encontrados mais trabalhos relativos ao aumento da capacidade de produção do que ao planeamento e expansão das redes de distribuição em Angola. Além disso, o próprio autor se apercebeu da existência de povoações bem próximas da capital onde a energia elétrica ainda nem sequer chegou ou, então, está constantemente a falhar, o que obriga as pessoas a disporem de geradores próprios a gásóleo.

Como tal, o estudo de um caso em contexto real cuja aplicabilidade é bastante promissora, constituiu um desafio e, simultaneamente, uma oportunidade.

1.2 Objetivos

Quando confrontados com a necessidade de reabilitar e expandir uma rede de distribuição de energia elétrica preexistente e bastante deficitária, essa expansão deve ser devidamente planeada para que seja possível encontrar a melhor solução.

Este trabalho de dissertação teve como principal objetivo propor uma adequada expansão da rede de distribuição de energia elétrica de uma região de Angola, na cidade de Luanda. Para tal, foi feito um levantamento da rede existente, registando-se a localização de todos os pontos de consumo e de todas as subestações. Foram propostos novos pontos de consumo e estudada a melhor localização de novas eventuais subestações. Foram analisados alguns modelos matemáticos propostos na literatura para representar a expansão de redes elétricas e

respetivas abordagens de resolução, tendo-se optado por uma representação do problema através de um modelo matemático de programação linear inteira mista (PLIM), que se mostrou adequado. Procedeu-se à sua resolução por recurso a *software* de otimização (Solver do Excel e CPLEX) e posterior validação da solução encontrada através da simulação do trânsito de potências (utilizando o *software* PowerWorld). Sempre que possível, recorreu-se a dados reais, obtidos em contexto real e resultado de relatórios oficiais. Foram considerados vários pressupostos que são identificados mais à frente em capítulo próprio.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, consistindo o presente capítulo de uma breve apresentação do tema do trabalho e da definição dos objetivos propostos.

No segundo capítulo é apresentado um diagnóstico sucinto do setor de atividade de energia elétrica em Angola, caracterização, evolução da procura de energia, objetivos, estratégias e metas para o setor elétrico. Neste capítulo é contextualizado o problema da expansão de redes de distribuição de energia elétrica no caso particular de Luanda.

No terceiro capítulo é feita uma revisão bibliográfica dos modelos matemáticos utilizados na formulação de problemas de expansão de redes de distribuição de energia elétrica, assim como de abordagens de resolução. É ainda justificada a opção por um modelo PLIM no caso em estudo.

No quarto capítulo é descrito em detalhe o modelo matemático resultante da aplicação prática ao caso de estudo de Luanda.

No quinto capítulo são analisados os resultados obtidos através quer do Excel Solver, quer do CPLEX, resultando numa proposta de solução de rede final. A solução encontrada, i.e., a rede original após expansão, é então implementada no simulador PowerWorl, sendo tiradas as devidas conclusões.

Por fim no último capítulo são apresentadas as principais conclusões tiradas do trabalho realizado, assim como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Distribuição de Energia Elétrica em Angola

No dia 4 de Abril de 2002 é assinado em Luanda um acordo formal de cessar-fogo entre Movimento Popular de Libertação de Angola (MPLA) e a União Nacional para a Independência Total de Angola (UNITA), marcando assim o fim de quase 4 décadas de conflito no país.

O esforço de libertação do país do controlo e regras coloniais Portuguesas teve início na década de 60. Contudo, só após a revolução de 1974 em Portugal e após a criação de um governo de transição (que durou menos de 1 ano), constituído por representantes do MPLA, da Frente Nacional de Libertação de Angola (FNLA) e da UNITA, foi possível a proclamação da independência formalmente a 11 de Novembro de 1975. O MPLA foi o governo reconhecido em Luanda, inicialmente sob a presidência de Agostinho Neto e, desde a sua morte em 1979, sob a presidência de José Eduardo dos Santos.

Angola é um país potencialmente rico, além das reservas substanciais de petróleo, possui também grandes depósitos de diamantes e outros minerais, tem um potencial hidroelétrico considerável, grandes superfícies de terra arável para a agricultura, boas quedas de água. No entanto, os conflitos ocorridos aquando da sua independência tiveram um efeito devastador na economia e na situação social. Antes da independência, a economia foi diversificada com agricultura, pesca, extração mineira e indústria. A produção de petróleo, segundo fontes económicas no endereço eletrónico do governo de Angola era cerca de 170.000 barris por dia. Após a independência, o decréscimo dos setores primários agricultura e pesca e um aumento na produção de petróleo para cerca de 1 milhão de barris por dia, tornou o setor do petróleo dominante na economia de Angola.

2.1 Diagnóstico do setor elétrico angolano

Atualmente, no mercado de energia elétrica angolano, existem duas principais entidades responsáveis pela produção, transporte, distribuição e comercialização de energia (Figura 1), a **ENE-EP** Empresa Nacional de Eletricidade de Angola, e a **EDEL** Empresa de Distribuição de Energia Elétrica. A EDEL é responsável pela distribuição e comercialização de energia em Luanda e algumas municipalidades, no restante território é a ENE-EP.

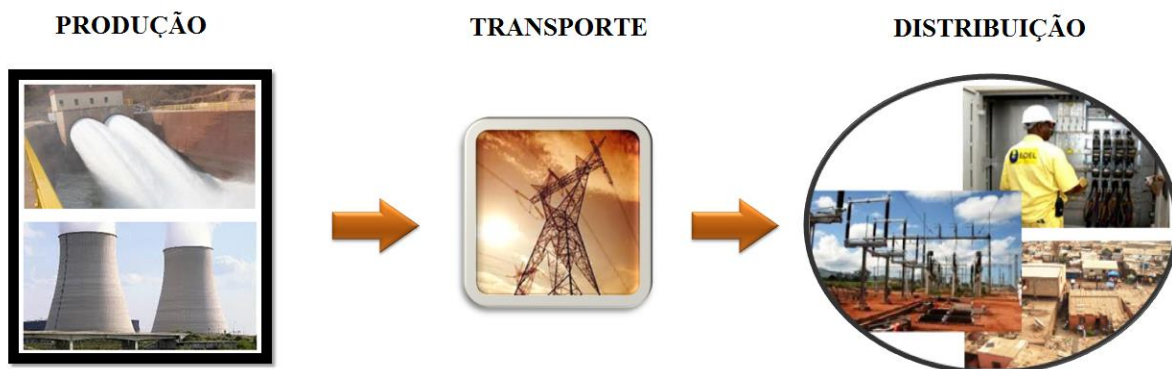
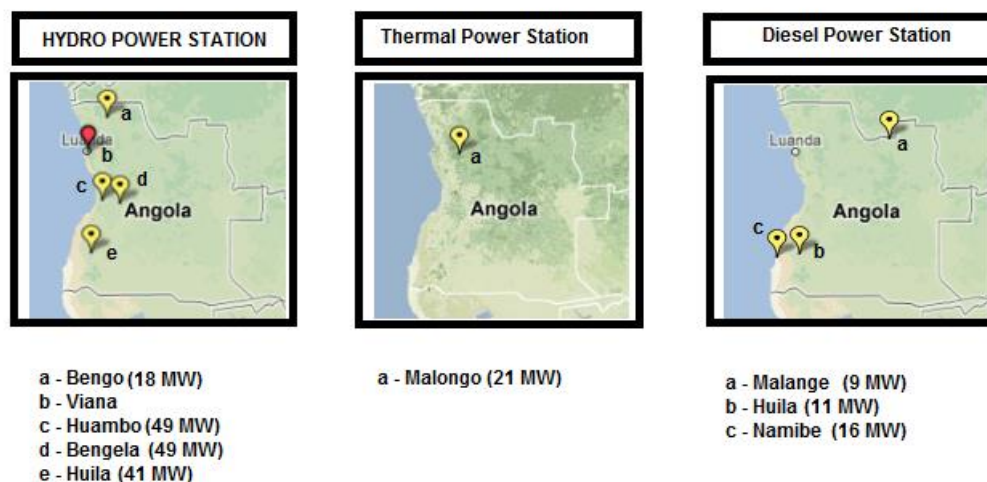


Figura 1 - Produção, transporte e distribuição energia elétrica

Grande parte da produção de energia elétrica em Angola tem a sua origem na vertente hídrica ou térmica (Figura 2), isto é, com uma potência instalada em centrais hidroelétricas nas barragens e uma outra parte da potência instalada nas centrais térmicas de turbina a gás,

de acordo com dados disponíveis *online* pela ENE-EP. A principal fonte de eletricidade é a energia hidroelétrica, que representava 68% da eletricidade gerada em 2010 [BES 2013].



Fonte: <http://www.mbendi.com/indy/powr/af/an/p0005.htm>

Figura 2 - Principais fontes de produção energia Angola

A energia produzida é depois transportada em redes de Alta Tensão ou Média Tensão até às subestações próximas dos centros de distribuição para aí ter lugar a respetiva comercialização.

Angola possui cerca de 47 bacias hidrográficas, com um caudal anual dos mais elevados em toda a África Austral, distribuídas pelas províncias de Kuanza, Keve, Cunene, Catumbela, Longa, N'gunza, Kubango. No entanto, estima-se que atualmente apenas seja gerada uma eletricidade correspondente a 5% do potencial hidroelétrico do país [BES 2013]. Na Tabela 1 podem consultar-se dados relativos a 2002, constantes do relatório da Agência Internacional de Energia [AIE, 2006], onde se refere que a potência instalada correspondia sensivelmente a 3% do potencial. Na Tabela 2 constam dados obtidos da ENE-EP quase uma década depois, em Setembro de 2011 onde, conforme se pode verificar, a percentagem da potência instalada face à potencial aumentou apenas muito ligeiramente (de 3% para 4,3%).

Tabela 1 - Capacidade instalada versus Capacidade potencial – dados de 2002

Potencial hidroeléctrico das principais bacias hidrográficas de Angola

	Área da bacia (Km ²)	Capacidade potencial (MW)	Capacidade potencial (GWh)	Capacidade Instalada (MW)	Instalada como % do potencial
Cuanza	147 738	8 199	34 746	458	6%
Longa	23 320	1 190	4 796		0%
Queve	23 000	3 020	11 786		0%
N'Gunza, Quicombo, Evale e Balombo	17 270	1 086	3 488		0%
Catumbela	16 640	1 930	10 660	49	3%
Cunene	128 600	2 492	6 225	41	2%
Cubango	148 860	350	592		0%
Total	505 428	18 267	72 293	548	3%

Fonte: Estratégia de Desenvolvimento do Sector Eléctrico de Angola (2002).

Tabela 2 - Capacidade instalada versus Capacidade potencial – dados de 2011

	Área da bacia (km ²)	Capacidade potencial (MW)	Capacidade Potencial (GWh)	Capacidade Instalada (MW)	Instalada como % do potencial
Kuanza	147 738	8 199	34 746	700	8,5 %
Keve	23 000	3 020	11 786	41	2%
Cunene	128 600	2 492	6 225	49	3%
Catumbela	16 640	1 930	10 660		0%
Longa	23 320	1 190	4 796		0%
N'gunza, Quicombo, Evala e Balombo	17 270	1 086	3 488		0%
Kubango	148 860	350	592		0%
	505 428	18 267	72 293	790	4,3%

Além disso, existem três sistemas de redes elétricas não interligados entre si: rede a Norte, ligada à bacia do Rio Kwanza, é a maior, sendo responsável pelo fornecimento de energia elétrica à capital, Luanda; rede a Leste, ligada à bacia do Rio Catumbela e rede a Sul, na bacia do Rio Cunene (Figura 3).

A longo prazo, o governo tem planeado a ligação dos três principais sistemas de energia. Vai ainda investir na interligação com as redes além fronteiras, dos países vizinhos, para permitir a Angola exportar eletricidade [BES 2013].

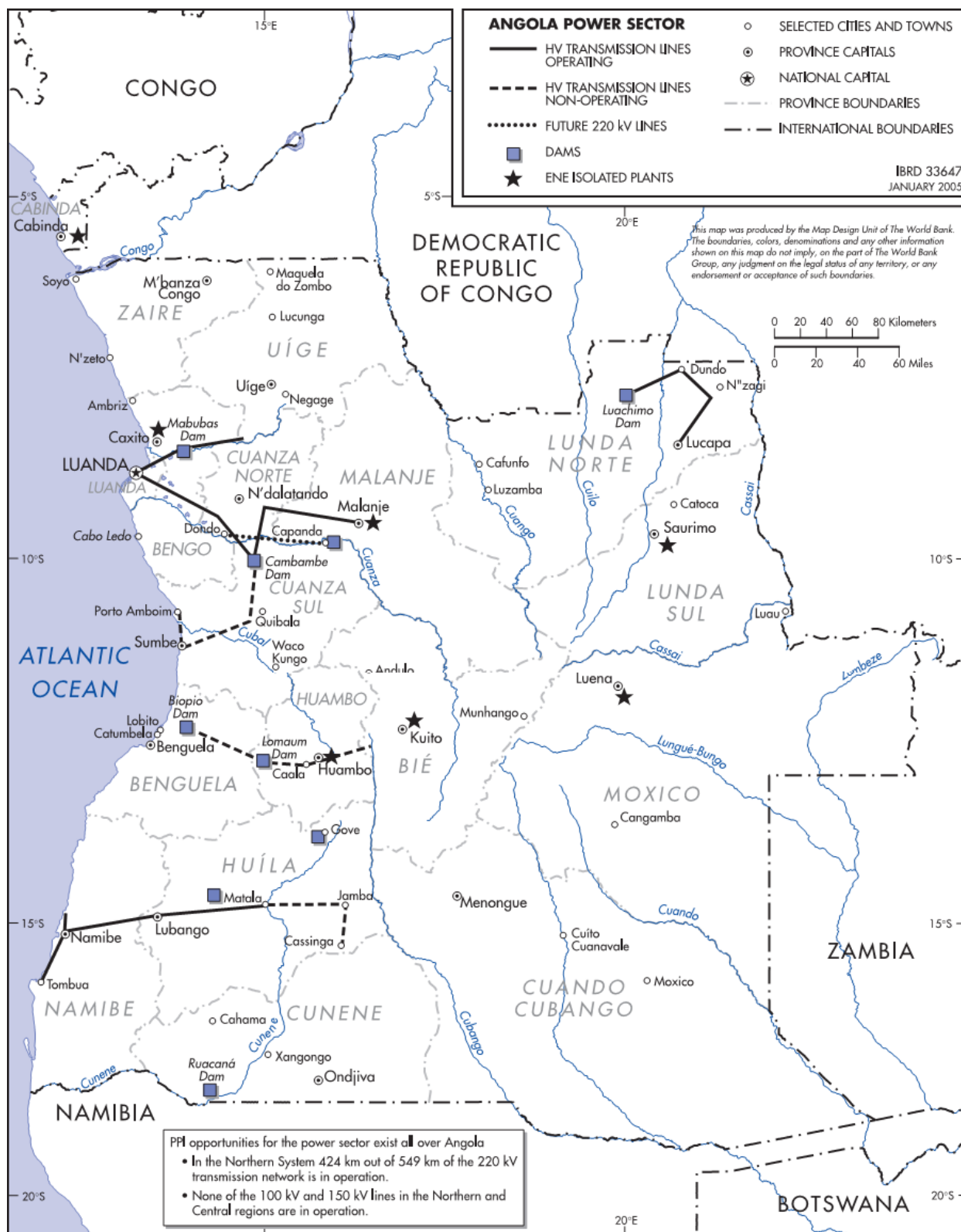


Figura 3 - Mapa Rede Elétrica Nacional Angola

Viver em Angola nos dias de hoje implica ainda uma grande preocupação com o garantir que o gerador se encontra em perfeito funcionamento carregado com combustível, de modo a

permitir que as habitações possam aguentar as várias horas que, diariamente, as pessoas ficam privadas do fornecimento de energia elétrica a partir da rede elétrica nacional.

Setor tutelado pelo Ministério de Energia, a energia chega aos inúmeros consumidores tanto pela ENE-EP como pelas autoridades locais reguladoras do mercado de compra e venda de energia elétrica (Figura 4).

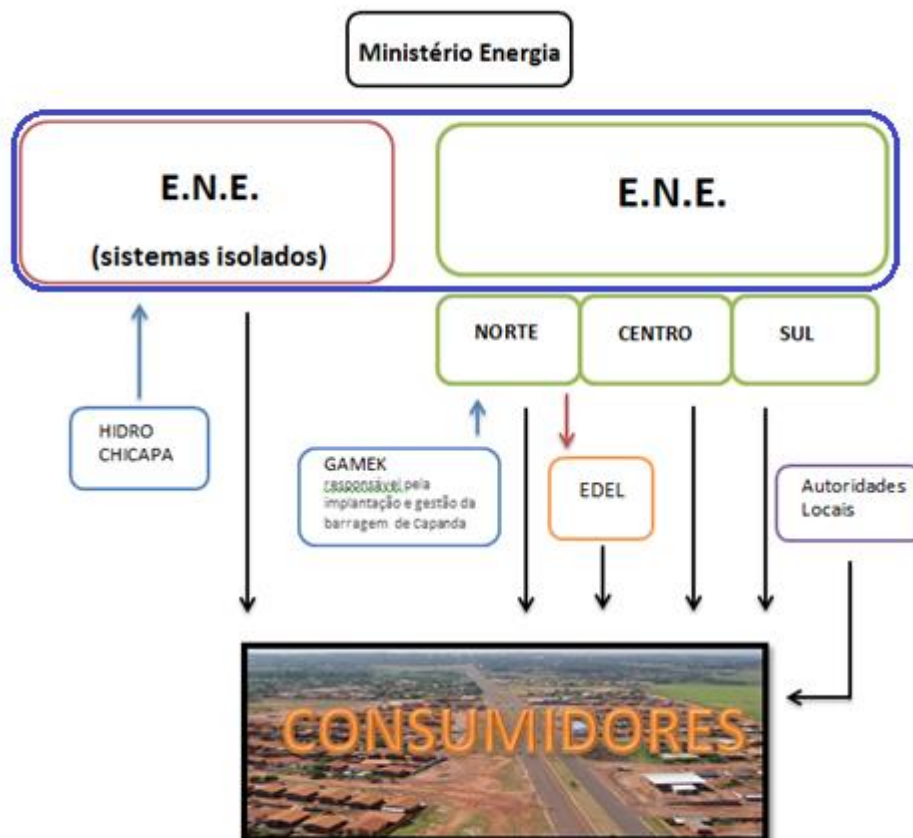


Figura 4 - Entidades responsáveis pelo fornecimento de energia eléctrica em Angola

Fatores como a elevada inoperacionalidade das infraestruturas e equipamentos atualmente existentes no setor elétrico (Figura 5), quer devido à intensidade de exploração, como da idade avançada dos equipamentos e à reduzida ou inexistente manutenção, ou mesmo da desorganização, levam a que as perdas técnicas de produção e transporte de energia elétrica sejam elevadas, logo, os custos de fornecimento de energia elétrica também o sejam.



Figura 5 – Reparação rede baixa tensão danificada Luanda

Identificado como um dos principais problemas em Angola é a diferença entre o valor cobrado de energia e o faturado (Tabela 3). Continuamente, a administração da EDEL tenta encontrar estratégias e tomar medidas para diminuir esta diferença, o que não tem sido fácil, uma vez que em 2009 e 2010 se verificava que apenas entre 81 a 82% do valor faturado era realmente cobrado e em 2011 este valor diminuiu para 78 %.

Tabela 3 - Valores cobrados vs faturados de energia elétrica (fonte: EDEL)

Ano Indicativo	Valor Cobrado (USD)	Valor Facturado (USD)	Diferença % Cobr/Fact
2009	\$ 50.849.200,00	\$ 62.642.100,00	81%
2010	\$ 67.497.101,70	\$ 82.580.066,20	82%
2011	\$ 72.271.976,68	\$ 92.414.085,05	78%

Um outro grande problema em Angola é o oportunismo das pessoas resultado da sua procura insistente de aproveitamento das outras pessoas. Tal facto leva a que haja uma preocupação constante das empresas de distribuição de energia em alertar a população para estes oportunismos. É disso exemplo o comunicado que se segue (Figura 6), de Março 2013:



Figura 6 - Comunicado EDEL

Como resumo, podemos afirmar que o setor elétrico em Angola apresenta atualmente o seguinte quadro:

- Carência em termos de fornecimento de energia elétrica com qualidade e fiabilidade;
- Fornecimento de energia elétrica restrito aos centros urbanos;
- Existência de elevadas perdas técnicas e comerciais;
- Escassez de recursos humanos qualificados para a reabilitação, expansão e modernização das infraestruturas elétricas;
- Existência de fragilidades da ação comercial (leitura, faturação e cobrança)

2.2 Contextualização: a cidade de Luanda

Luanda, capital de Angola, é uma cidade projetada para uma população de 500.000 habitantes. Contudo, após a independência, as pessoas tenderam a deixar as zonas rurais e concentrar-se na cidade tendo esta crescido, de acordo com dados estatísticos do Instituto Nacional de Estatística do Governo de Angola, de 1.6 milhões em 1990 para mais de 5 milhões em 2012. O resultado foi o crescimento acentuado, desordenado e não controlado, o

que tem provocado sérios problemas económicos e sociais – desde a escassez de habitações, ao deficiente saneamento básico, abastecimento de água e energia elétrica, insuficiência de estradas, aumento do desemprego e consequentemente aumento dos índices de pobreza.

As infraestruturas sociais não conseguiram acompanhar este aumento explosivo da população urbana, pelo que os padrões de vida se tornaram cada vez mais difíceis para a população em geral. Com o intuito de reconstrução da economia, o setor energético foi considerado pelo governo angolano um eixo prioritário, nomeadamente, o aumento da capacidade de produção instalada, a reabilitação e expansão das redes de transporte e distribuição e a comercialização de energia.

2.2.1 Sistema elétrico de distribuição existente

No final de 2012, o Parque de Alta Tensão em Angola, fiscalizado pela EDEL, era composto por 16 subestações de 60/15 KV [EDEL, 2011] , conforme consta na Tabela 4

Tabela 4 - Lista de Subestações (SE) em Angola em Dezembro de 2012

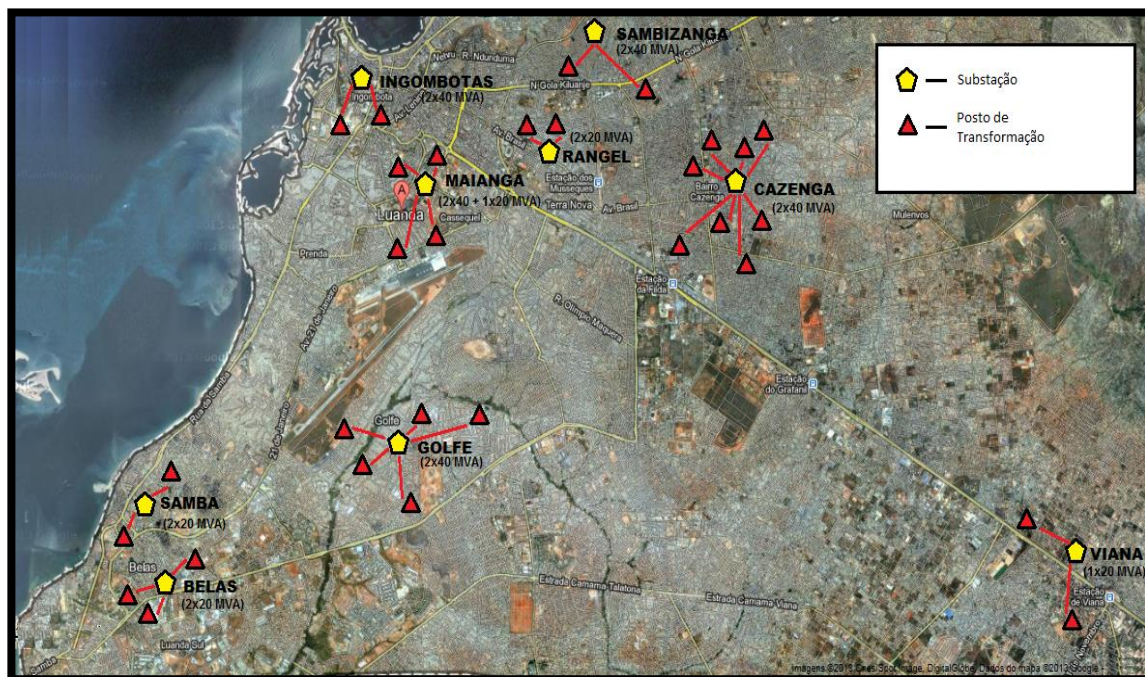
- SE BELAS;	- SE MÓVEL II;
- SE BOAVISTA;	- SE MUTAMBA;
- SE CHICALA	- SE NGOLA KILUANGE;
- SE CUCA;	- SE NOVA VIDA;
- SE EDIFICIO SEDE;	- SE SAPÚ;
- SE ESTRADA DE CATETE;	- SE TALATONA;
- SE GOLFE;	- SE VIANA VILA;
- SE MAIANGA;	- SE ZANGO;

Face à disponibilidade de dados atuais, foram consideradas para o presente estudo apenas as subestações existentes na área selecionada para as quais os valores de potência nominal, potência de ponta, número de postos de transformação em serviço, são conhecidos. Esses dados encontram-se detalhados na Tabela 5.

Tabela 5 - Subestações em Luanda e sua caracterização

Subestação	Localização	Potência Nominal (MVA)	Ponta (MW)	Postos de Transformação em Serviço
SE BELAS	Samba	2x20	32	82
SE BOAVISTA	Sambizanga	2x40	36	87
SE CUCA	Cazenga	2x40	84	140
SE ESTRADA DE CATETE	Rangel	2x20	35	79
SE GOLFE	Kilamba Kiayi	2x40	75	203
SE MAIANGA	Maianga	2x40 + 1x20	87	196
SE MUTAMBA	Ingombotas	2x40	73	180
SE VIANA VILA	Viana	1x20	19	312

A localização no mapa de Luanda das subestações em estudo, assim como dos postos de transformação, pode ser visualizada na Figura 7.

**Figura 7 - Extrato do mapa de Luanda com Localização das Subestações em Estudo**

O governo de Angola está também, atualmente, a encorajar as empresas com programas de conservação e eficiência energética com a introdução de lâmpadas economizadoras na iluminação pública e equipamentos de baixo consumo.

2.2.2 Evolução da procura / oferta de energia

Apesar de ter já sido executado um volume importante de investimentos na rede de distribuição com a implantação de várias instalações elétricas, é aceitável pressupor que a oferta de eletricidade esteja aquém do valor da procura a nível da Cidade de Luanda, devido ao aumento considerável de novos edifícios, centros comerciais, agências bancárias, pequenas e médias indústrias, além das necessidades crescentes por climatização. A Tabela 6 ilustra a variação do défice energético ao longo do ano.

Tabela 6 - Variação do défice energético na Cidade Luanda ao longo ano 2011

Meses	Procura Energia Eléctrica (MW)	Disponibilidade (MW)	Diferencial (MW)
JANEIRO	500	350	150
FEVEREIRO	520	460	60
MARÇO	530	470	60
ABRIL	540	480	60
MAIO	530	520	10
JUNHO	430	430	0
JULHO	420	430	-10
AGOSTO	470	470	0
SETEMBRO	450	363,5	86,5
OUTUBRO	450	330	120
NOVEMBRO	450	330	120
DEZEMBRO	500	450	50
TOTAL	5790	5083,5	706,5

Angola caracteriza-se por ter apenas duas estações climáticas no ano, a estação seca, normalmente designada de “cacimbo” (Figura 8), e a estação das chuvas.



Figura 8 - Paisagem Época Cacimbo Angola

O Cacimbo tem início a 15 de Maio e termina a 15 Agosto, durante este período a chuva é praticamente inexistente, o que leva a que o nível freático das barragens diminua bastante, não havendo portanto grande capacidade de produção de energia elétrica a partir das barragens, sendo estas as principais fontes de produção de energia elétrica do país (Figura 9).



Figura 9 - Barragem de Cabambe (Kuanza Norte)

Na Figura 10 é representado o gráfico de défice energético na Cidade de Luanda ao longo das respetivas estações do ano (época de chuvas e época seca), onde se pode constatar a quebra de oferta de energia elétrica verificada no final do mês de Agosto 2011, após um período praticamente sem chuva, levando a que o nível freático das barragens seja diminuto, logo, diminuindo os recursos hídricos para a produção de energia a partir das barragens.

O ligeiro aumento na oferta durante o mês de Agosto, mês onde ocorrem diversos eventos sociais e culturais, é explicado pelo recurso à produção de energia elétrica a partir de outras fontes, nomeadamente, centrais térmicas.

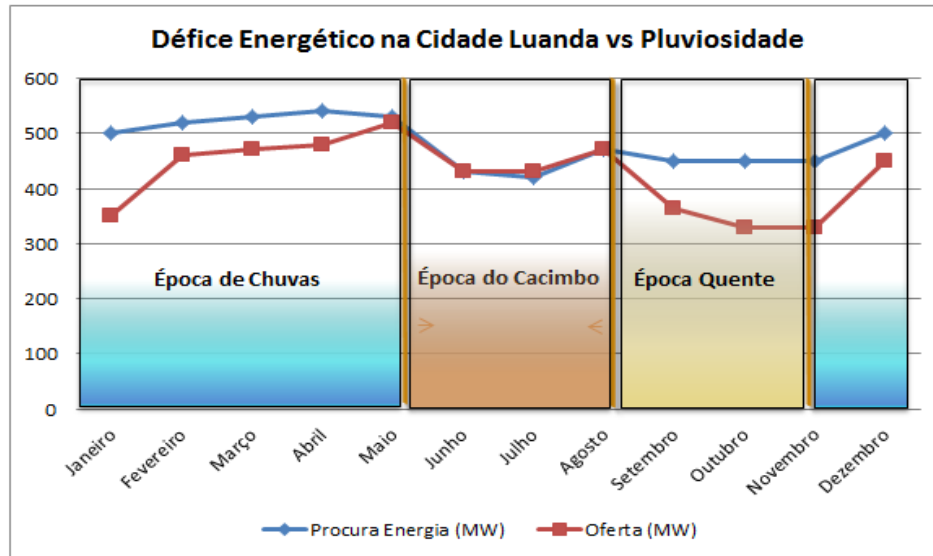


Figura 10 - Representação gráfica do déficit energético de Luanda vs Estações do ano (dados de 2011)

2.2.3 Planeamento da expansão da rede de distribuição

Atualmente, grande parte dos pontos de consumo existentes no local em estudo não são providos de energia elétrica. Como exemplo: locais como Samba, Cazenga, Rangel, Kilamba Kiayi, Maianga e Ingombotas.

De seguida, são apresentados na Tabela 7 os dados mais atuais disponíveis, resumo do levantamento efetuado dos valores de potência de fornecimento disponível em cada um dos pontos de consumo [EDEL, 2011].

Tabela 7 - Pontos de consumo e suas necessidades de potência

Ponto de consumo	Localização	Nº Postos de Transformação em serviço	Potência total consumo (MVA)	Potência Disponível (MVA)	Diferencial
1	Sambizanga	87	69,6	80	10,4
2	Ingombotas	180	144	80	-64
3	Maianga	196	156,9	100	-56,9
4	Rangel	79	63,2	40	-23,2
5	Cazenga	140	112	80	-32
6	Golfe	203	162	80	-82
7	Samba	82	65,6	40	-25,6
8	Belas	82	65,6	40	-25,6
9	Viana	12	9,6	20	10,4
12 a 25	S10-S11-S12	10	104	novas SE	---

Nota: Postos de transformação de 800 kVA em funcionamento a 85% da sua capacidade total

Analisando os dados da Tabela 7, podemos concluir que existem pontos de consumo em que apenas parte da procura é satisfeita, os pontos 2 a 8. Os pontos de consumo 1 e 9, à data do estudo e com os dados disponíveis, são abastecidos na totalidade das suas necessidades.

Os pontos 12 a 25, são pontos de consumo propostos a alimentar pela nova rede a ser criada, procurando abastecer locais que atualmente não são providos de energia elétrica, sendo as habitações alimentadas com recurso a geradores próprios.

De acordo com os dados obtidos da EDEL, considerou-se que os postos de transformação em serviço em cada um dos locais de consumo têm uma potência nominal de 800 kVA, estando a funcionar a 85 % da sua capacidade total.

2.3 Definição do problema de expansão de redes de distribuição

Um aumento significativo da procura de energia elétrica deu origem a que o problema de expansão dos sistemas de distribuição fosse considerado como um dos mais importantes para as empresas comercializadoras deste serviço, dados os consideráveis investimentos que necessitam de serem feitos nessa área.

Para um sistema de distribuição de energia elétrica específico, a carga é conhecida e a procura futura pode ser estimada para um período normalmente de um ano ou vários períodos de um ano. O problema de uma forma geral consiste em saber como planejar a expansão do sistema de distribuição para esses períodos satisfazendo os consumos, minimizando custos e maximizando a segurança, fiabilidade e qualidade de serviço na transmissão de energia elétrica.

O planeamento de expansão de uma rede elétrica de forma eficiente tem-se revelado de extrema importância, tanto para as empresas distribuidoras, como para os consumidores. O objetivo é o desenvolvimento de um sistema de distribuição que tenha em conta os seguintes aspetos fundamentais:

- Segurança

Este fator é deveras importante no planeamento destes sistemas. O sistema de distribuição deve funcionar de forma segura, tanto para os consumidores, como para os seus operadores.

- Economia

Minimização de custos que podem ser desde os custos de investimento (construção ou reforço de linhas, subestações e transformadores, postes) como os custos de operação (exemplo perdas de energia, etc.)

- Fiabilidade

Procura-se evitar a privação do fornecimento de energia elétrica, o permanente “apaga-acende” típico em Luanda que, além do transtorno, danifica aparelhos eletrodomésticos e alimentos que necessitam de aparelhos de refrigeração

- Qualidade de serviço

Não só de aspetos relacionados com a fiabilidade do sistema, existem outros fatores de qualidade importantes no planeamento, tais como:

- Impacto ambiental
- Flutuações no valor da tensão no consumidor
- Presença de harmónicos

Os objetivos económicos são normalmente conflituosos com fatores como a segurança, fiabilidade ou qualidade de serviço. Na verdade, um sistema com melhor desempenho é conseguido normalmente através de um investimento superior. Investimentos baixos poderão conduzir a uma baixa eficiência do sistema onde o número de cortes de fornecimento de energia poderá ser elevado.

A expansão de um sistema de distribuição de energia elétrica envolve obras e aquisição de equipamentos com custos elevados, pelo que é crucial existir um bom planeamento. Pelo exposto acima, compreende-se que o problema é complexo e a qualidade da solução encontrada depende de um rigoroso levantamento de dados, requisitos a ter em consideração e restrições conhecidas *a priori*. O problema inicial que se impõe é a definição da dimensão, número e localização das novas subestações e respetivas linhas de transmissão de energia elétrica, de modo que o custo de instalação e de operação seja o menor possível. Como tal, deverão ser considerados no problema de expansão de uma rede elétrica os seguintes requisitos principais:

- Levantamento da rede existente, com conhecimento de todas as capacidades de subestações existentes, possibilidade de aumento das suas capacidades, linhas, etc.;
- Quantificação da procura, potência instalada, potência necessária, potência possível;
- Identificação de restrições à instalação de novas subestações e traçados de linhas;
- Estudo prévio dos aspetos geográficos e geológicos do terreno;
- Restrições elétricas e restrições físicas;
- Prazos, para efeitos de investimento;

Capítulo 3

Problema de Expansão de Redes de Distribuição – Revisão da Literatura

Em Angola, o crescimento da procura de energia elétrica é uma realidade e assim continuará durante as próximas décadas, pelo que há uma necessidade urgente de expansão dos sistemas elétricos existentes.

Os principais componentes de um sistema elétrico são a produção, o transporte e a distribuição da energia elétrica. Uma vez que este trabalho incide sobre um sistema elétrico real, existente na cidade de Luanda, foi efetuada uma revisão bibliográfica tendo por base a seguinte orientação: inicialmente foram pesquisados trabalhos relacionados com sistemas elétricos em geral, em Angola ou países afins; de seguida, após análise dos trabalhos encontrados e dado não terem sido encontrados trabalhos relevantes na área da distribuição de energia em Angola, foi escolhida a expansão da rede de distribuição da região de Luanda como tema desta dissertação, pelo que a segunda parte da revisão da literatura incidiu no problema da expansão de redes de distribuição de energia elétrica.

No final do capítulo é descrito em detalhe o modelo matemático escolhido para a formulação matemática do problema de distribuição objeto de estudo, o modelo PLIM.

3.1 Trabalhos publicados sobre Angola e países afins

É escasso o número de publicações reportando diretamente o caso de Angola e mesmo sobre o continente africano na generalidade, pelo que se alargou a pesquisa a outros países subsaarianos. Por volta do virar do século foi realizado um estudo sobre os recursos africanos no setor de energia elétrica, de que se destaca [Hammons, et al, 2000]. Neste artigo é feito um diagnóstico do estado do setor de energia elétrica africano e das necessidades de melhorar as infraestruturas, bastante limitadas. São apresentados estudos de viabilidade de interligação dos sistemas de energia, nomeadamente, é analisada a sua expansão futura e a implementação de uma rede unificada de energia Africana. O artigo discute os sistemas de poder existentes em África e apresenta a ideia de dividir o continente em cinco regiões principais de aproximadamente a mesma área de superfície para o comércio de eletricidade. É ainda apresentado um cenário para o balanço energético até 2050, o qual engloba a exportação de energia elétrica para os continentes vizinhos, principalmente a Europa, de mais de 200 TWh/ano.

Em 2002, [Karekezi, 2002] avaliam o potencial das energias renováveis na melhoria da qualidade de vida dos pobres do continente africano. O documento analisa cinco principais tecnologias de energia renovável: (i) a energia da biomassa em larga escala, (ii) a energia da biomassa em pequena escala (iii) a energia solar fotovoltaica, (iv) a energia solar térmica e (v) a energia eólica. De seguida, é avaliada a adequação de cada diferente tecnologia de energia renovável na resposta às necessidades de energia dos meios urbanos e rurais mais pobres. O artigo termina com a sugestão de um conjunto de medidas que poderiam incentivar a difusão em larga escala de tecnologias de energias renováveis para diminuir a pobreza em África.

Em 2009 é apresentado em conferência um artigo [Diabinho, et al, 2009] que aborda o planeamento da expansão de redes de distribuição para uma procura em crescimento acelerado através de técnicas de simulação. O trabalho trata especificamente da rede de distribuição em AT e MT da EDEL, em Luanda, Angola, que está a ser estudada em conjunto pela EDP e EDEL. No documento são descritas as metodologias utilizadas para o

levantamento da rede existente, para avaliar o estado operacional de rede existente, pontos fortes e fracos e desenvolver estratégias para superar os problemas encontrados, reduzir as perdas, melhorar a confiabilidade e segurança.

Uma temática que não deixou de ser tratada é a eventual ligação entre o terrorismo e a segurança energética. A título de exemplo, refere-se o estudo descrito em [Toft, 2010], que investiga as práticas de ataques terroristas contra infraestruturas de energia e discute como podem ser entendidas e de que forma países importadores de energia poderiam beneficiar de estratégias de desenvolvimento para aumentar a estabilidade no fornecimento de energia elétrica.

Têm sido realizados em Portugal, no âmbito de dissertações de mestrado realizadas por alunos oriundos de países africanos de língua oficial portuguesa, alguns estudos sobre esses mesmos países, onde se inclui Angola.

[Leote, 2009] sugere a aplicação de sistemas solares fotovoltaicos para a eletrificação de povoados remotos africanos carenciados. A abordagem pretende refletir sobre a importância destes sistemas como forma de intervenção naquelas que são consideradas as maiores dificuldades dos países subdesenvolvidos, ou seja, saneamento básico, serviços de saúde e meios de comunicação. Nesse contexto, é estudada a viabilidade de alimentar com energia elétrica produzida localmente unidades sanitárias numa província de Moçambique. O trabalho descreve um estudo de caso baseado numa dessas unidades.

Já [Cardoso, 2011] efetua uma análise comparativa em termos económicos e ambientais entre duas hipóteses para a expansão do sistema de geração de eletricidade a médio-longo prazo (2030) da ilha de Santiago, a maior ilha de Cabo Verde. Apresentam um cenário que engloba a evolução do sistema sob o paradigma da produção centralizada de energia e um outro cenário onde o aumento de capacidade instalada será efetuado apostando na descentralização dos sistemas de produção. No desenvolvimento do trabalho utilizam duas ferramentas de modelação energética, LEAP e HOMER. Do estudo concluem que as energias renováveis têm um impacto fundamental no futuro sistema elétrico da ilha.

A mesma conclusão sobre o impacto fundamental das energias renováveis em Cabo Verde é retirada em [Monteiro, 2012], que apresenta um estudo de um ponto de vista mais economicista e menos de engenharia das potencialidades dos vários tipos de fontes de energias renováveis.

[Lima, 2011], no âmbito da sua dissertação de mestrado, apresenta uma descrição detalhada da coordenação da atividade fiscalizadora de um projeto de aumento da capacidade térmica da cidade de Luanda, que consistiu na instalação de duas Centrais Térmicas de Terra e duas marítimas sobre Barça, caracterizadas por grupos Turbinas a Gás respetivamente com 1x25 MW, 2x25MW, 2x46 MW e 1x42,1 MW.

Ainda um caso de estudo no continente africano, em [Chinwuko, et al, 2012], cujos autores propõem uma abordagem através de programação dinâmica, onde incorporam os vários tipos de custos, apresentando uma solução iterativa resolvida sequencialmente em três fases de otimização. Usam programação quadrática inteira mista e programação não linear inteira mista na modelação das várias fases. O objetivo é a determinação do número ótimo de subestações e da sua localização exata. O método desenvolvido foi aplicado ao planeamento do sistema de distribuição de energia de uma região na Nigéria.

3.2 Abordagens ao problema de expansão de redes de distribuição

Em geral, o principal objetivo da expansão de um qualquer sistema é responder ao crescimento da procura da forma mais económica, confiável e segura possível. Claro que fatores de segurança e confiabilidade são normalmente antagónicos com objetivos económicos, pelo que deve ser dada grande importância à fase de planeamento. Vários métodos e abordagens têm sido estudados e continuamente publicados ao longo dos últimos 50 anos para tratar o problema da expansão de redes de distribuição.

Embora existam trabalhos publicados sobre sistemas elétricos anteriores a 1960, estes versam a análise de desempenho, surgindo apenas nesta data [Knight, 1960] o primeiro trabalho no planeamento de redes de distribuição. Partindo das posições geográficas das subestações que é necessário interligar e escrevendo um conjunto de equações lineares que garanta as condições de oferta e de procura, o autor demonstra que pode ser resolvido por técnicas de programação linear o problema de obtenção de um projeto de rede de custo mínimo. A solução do sistema de equações lineares resultante requer o uso de um computador digital que, desde 1952, foi sendo cada vez mais utilizado para obter soluções numéricas de equações. Claro que as reduzidas capacidades de cálculo dos computadores digitais à data não permitiam a resolução de redes muito extensas.

Desde então, um número significativo de estudos tem sido dedicado à otimização de sistemas de distribuição. Em 2000, [Vaziri, et al, 2000 a)] analisa as contribuições dos anteriores 40 anos na área do planeamento da expansão de redes de distribuição, apresentando uma categorização baseada em diferentes critérios.

Considerando os métodos de otimização utilizados, os trabalhos publicados podem ser divididos em duas categorias distintas: métodos exatos, de programação matemática e métodos heurísticos, incluindo inteligência artificial e algoritmos evolucionários. É interessante notar que quase todas as pesquisas anteriores a 1980 utilizam algoritmos de programação matemática, enquanto os trabalhos a partir de 1980 se centram em torno das técnicas heurísticas, predominantemente os Algoritmos Genéticos.

Considerando as abordagens ao problema de expansão de redes de distribuição, as abordagens utilizadas podem ser divididas em duas categorias distintas, único período ou estático e múltiplos períodos ou dinâmico. Uma abordagem em múltiplos períodos refere-se ao caso em que os requisitos para a expansão total da área são determinados em planos sucessivos de expansão ao longo de várias fases, o que representa, devido à dependência entre as fases, um maior desafio de formulação. A grande maioria dos trabalhos publicados refere-se a um único período.

Ainda segundo os mesmos autores, os esforços até 2000 também diferem em relação às variáveis de decisão escolhidas para a obtenção da solução desejada: número de subestações, sua localização, número e localização de alimentadores principais, dimensão das linhas, etc. Concluem o artigo considerando que uma abordagem com múltiplos períodos de facto, que garanta a otimalidade global, não foi ainda desenvolvida. Por esse motivo, em [Vaziri, et al, 2000 b)] propõem uma modelação segundo um problema de fluxo de custo mínimo num grafo orientado.

A título de exemplo, referem-se alguns dos trabalhos mais significativos em cada uma das diferentes abordagens, apresentados numa sequência cronológica.

[Oldfield and Lang, 1965] propõem uma técnica de programação dinâmica para a resolução de um problema em duas fases, a conceção do projeto e a otimização, aplicadas consecutivamente em vez de simultaneamente. Com esta técnica conseguem lidar com as dificuldades devidas ao grande número de variáveis e a complexidade do processo de planeamento.

Mais tarde, o modelo de programação inteira mista usado por [Adams and Laughton, 1974] inclui o custo de linearização das perdas do cobre, determinando esquemas de transferência de carga e as datas para a instalação de subestações, minimizando o custo das perdas do transformador da subestação.

[Crawford and Holt, 1975] optam por uma abordagem de programação linear, utilizando o algoritmo de transporte para otimizar as áreas de serviço da subestação minimizando os produtos da procura e as distâncias de subestação. Esta técnica minimiza as perdas com os cabos alimentadores de distribuição, contudo, poderá não chegar ao planeamento de expansão ideal uma vez que ele não minimiza o valor dos custos associados à expansão.

[Gönen, Foote, 1981] desenvolveram um modelo matemático de programação inteira mista para determinar o traçado ideal dos sistemas de distribuição. Na sua abordagem, os autores linearizam a curva de custo por si só não-linear, usando pequenos ramos de equações lineares à custa do aumento do número de variáveis.

Em [Ponnavaikko, et al, 1987], os autores formularam o problema de expansão dos sistemas de distribuição como um problema de programação quadrática inteira mista, com variáveis inteiras e contínuas sujeito a restrições lineares de desigualdades. Os custos fixos das linhas de transmissão, das subestações e das perdas nas linhas compõem a função objetivo. Nesta abordagem, o problema é resolvido em duas fases. Na primeira, usando o método do gradiente reduzido de Wolf, onde as variáveis com valores inteiros e binários são tratadas como variáveis contínuas reais. Na segunda, utilizando a função de programação inteira mista quadrática. É na primeira fase que são escolhidas as subestações que deverão fazer parte (ou não) do sistema. Uma vez escolhidas as subestações que farão parte do sistema, são analisadas as linhas de transmissão que deverão também fazer parte, sendo que o maior custo é representado pela construção / aumento das subestações. Feita a escolha das subestações e das linhas de transmissão o problema é redefinido e uma vez mais resolvido utilizando o método do gradiente reduzido de Wolfe, que através de uma heurística construtiva, vai permitir definir os traçados das novas linhas de transmissão. O sistema utilizado pelos autores para testar este método foi um sistema composto por 8 pontos de consumo, duas potenciais subestações e 15 linhas de transmissão de energia elétrica.

O método do gradiente reduzido de Wolf [Wolfe, 1963], para problemas de minimização com restrições lineares, em que basicamente se define que um conjunto de restrições de igualdade não lineares é um sistema de equações onde, de forma subentendida, é possível

colocar algumas variáveis em função de outras e assim, a minimização com esse conjunto de restrições passa a ser um problema absoluto cujas variáveis são, justamente, as variáveis selecionadas como independentes.

Mais recentemente, a par com técnicas e abordagens mais avançadas, é ainda usual a adoção de técnicas clássicas de otimização, como o comprova o trabalho publicado em [Sousa, et al, 2011]. Neste trabalho é proposto um modelo de programação linear binário misto para o problema de planeamento de expansão de redes de distribuição de energia elétrica, o qual é resolvido através de técnicas clássicas de otimização. O modelo reflete os custos de investimentos com a instalação de novos alimentadores, adequação de alimentadores existentes, construção de novas subestações, aumento de potência de subestações já existentes, os custos de operação da rede e também as características técnicas de operação do sistema global. Foi resolvido um sistema descrito na literatura através do *software* CPLEX e os resultados obtidos demonstram a qualidade e a validade do modelo proposto.

Para terminar, não podiam deixar de se referir as abordagens multiobjetivo, em franco desenvolvimento atualmente. Em [Cossi and Silva, 2011], os autores apresentam um modelo de planeamento multiobjetivo de expansão de redes de distribuição de energia elétrica de MT que considera duas funções objetivo: 1- custos de investimentos de expansão e operação das redes de MT; 2- custos da confiabilidade do sistema na ocorrência de contingências na rede. Para resolver o problema é proposto um algoritmo Tabu Search Reativo Multiobjetivo.

Capítulo 4

Caso de Estudo – Cidade de Luanda

No presente capítulo é descrito um modelo matemático de programação linear inteira mista (PLIM), aplicado ao problema de expansão de uma rede elétrica em Angola, baseado na abordagem apresentada nas referências [Ponnavaikko, et al, 1987] e [Sousa, et al, 2011].

4.1 Rede existente e planeamento da expansão

Numa primeira fase é efetuado o levantamento dos dados do problema, dados esses que são tratados de forma a serem parametrizáveis no *software* de otimização.

Como ponto de partida na implementação do modelo matemático linear aplicado à distribuição de energia elétrica, começou-se por implantar as subestações existentes e respetivos pontos de consumo (Figura 11), que teve como base a sua localização exata no terreno. Foram definidas as variáveis x_i em cada linha i como a potência a transitar nessa linha.

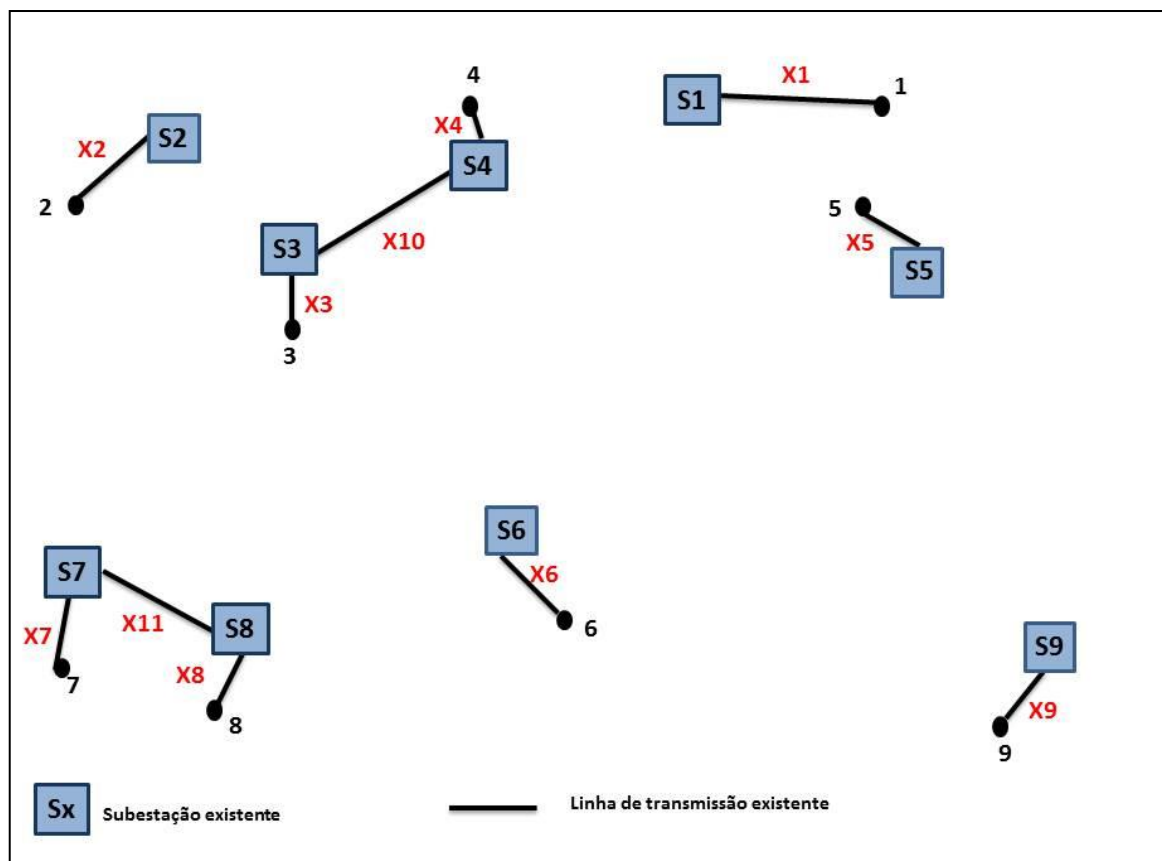


Figura 11 - Implantação das subestações e pontos de consumo existentes

De seguida, e procurando colmatar uma das falhas do sistema atual de fornecimento de energia, em que as subestações existentes não são suficientes para os pontos de consumo, assim como vários pontos de consumo não são ainda providos de energia elétrica, procurou-se a partir da análise geográfica habitacional aumentar o número de subestações e de pontos de consumo, assinalados a verde na Figura 12.

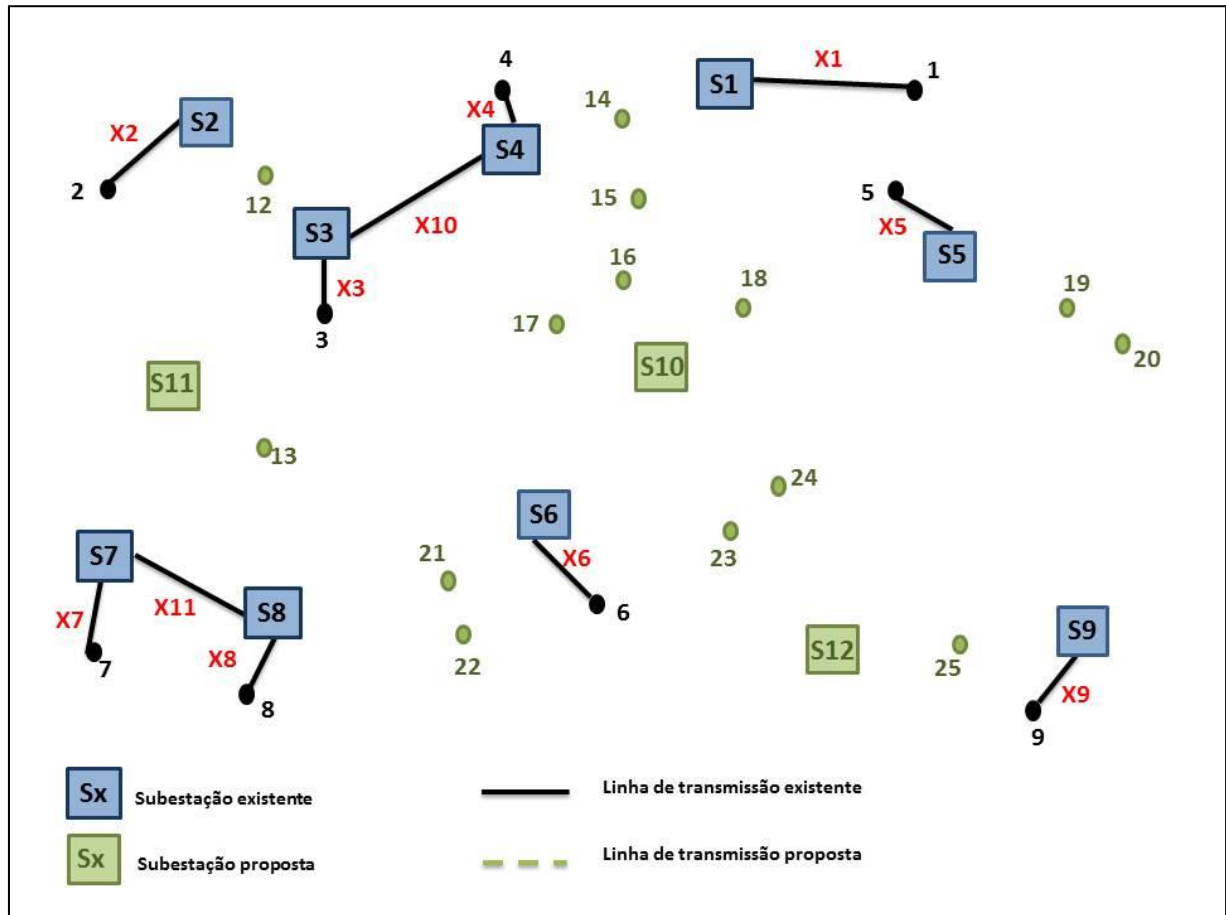


Figura 12 - Pontos de consumo existentes e propostos, a alimentar

A rede de teste a ser introduzida na plataforma Analytic Solver e CPLEX, será uma rede constituída por 12 subestações, 23 pontos de consumo e 34 linhas de transmissão de energia elétrica (Figura 13).

O número de subestações propostas teve como base o estudo comparativo da potência total atualmente disponível (soma das potências das subestações existentes) com a potência necessária alimentar (soma da totalidade dos pontos de consumo). A proposta de localização para estas subestações teve como princípio a proximidade aos pontos de consumo e a viabilidade geográfica, isto é, em terrenos atualmente desocupados e pertencentes ao governo Angolano.

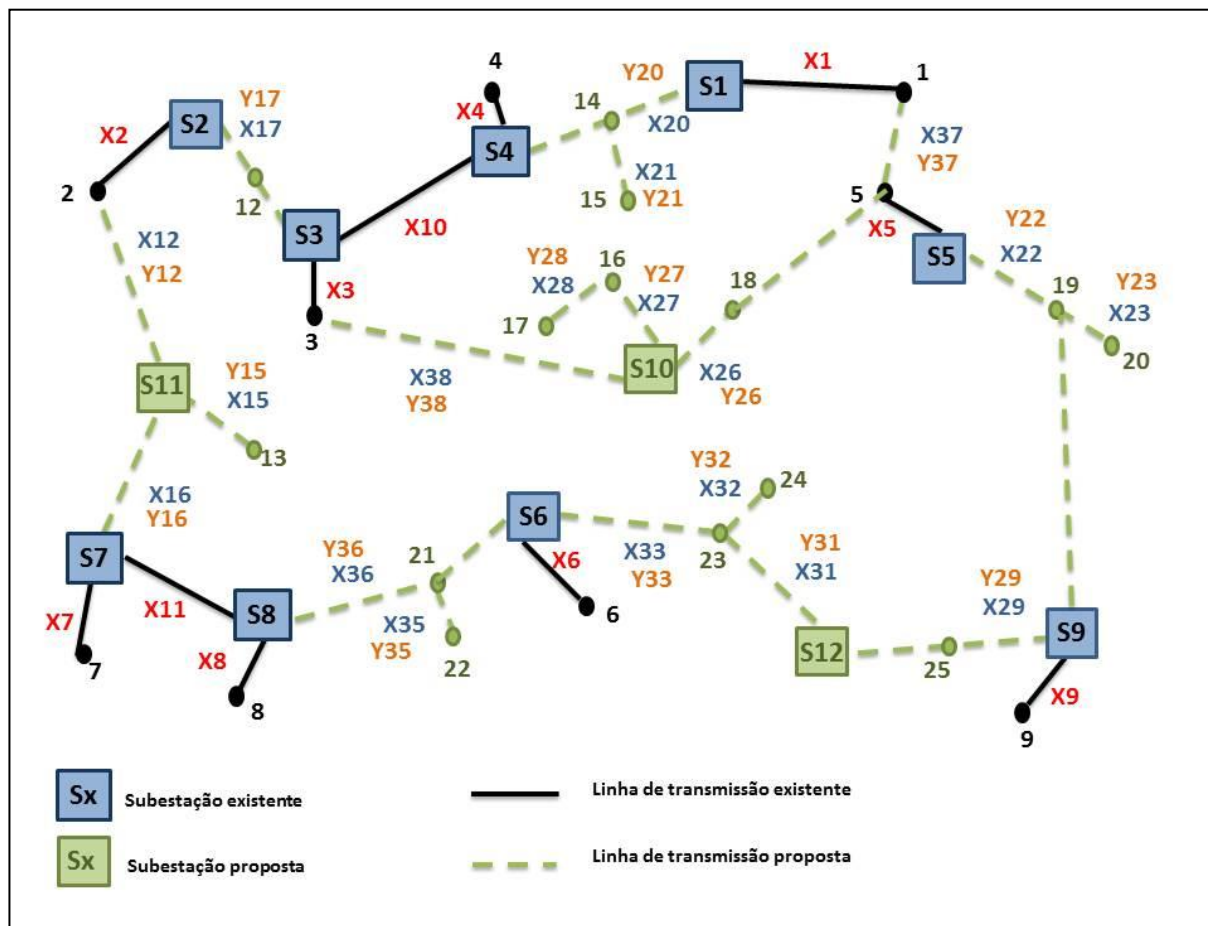


Figura 13 - Rede a implementar no software

Na Tabela 8 são indicados os comprimentos (em km) de cada uma das linhas que constituem a rede de distribuição de energia elétrica de teste, em correspondência direta com cada variável x_i .

Tabela 8 - Comprimentos das linhas de transmissão de energia elétrica

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
1,80	2,13	1,73	0,70	0,95	2,25	1,04	1,30	1,75	3,74	1,24	1,42
X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26
2,30	6,55	1,50	1,50	2,17	2,35	0,90	4,15	2,80	9,00	2,18	1,43
X27	X28	X29	X30	X31	X32	X33	X34	X35	X36	X37	X38
1,15	1,24	7,23	5,00	1,85	1,15	2,75	2,70	1,87	3,50	1,05	4,00

4.2 Formulação matemática do problema de expansão como um modelo PLIM

O modelo matemático de programação linear inteira mista é caracterizado por todas as restrições e função objetivo serem lineares. Algumas das variáveis são reais não negativas (quantidade de energia a transportar num dado ramo), as outras são inteiras e binárias (se vai existir ou não um dado componente, ramo ou subestação).

Na presente seção é descrito um modelo PLIM aplicado à expansão da rede elétrica de Luanda, baseado na abordagem apresentada nas referências [Khodr, 2009] e [Sousa, Flores e Mantovani, 2011].

4.2.1 Função objetivo

Como função objetivo considerou-se a minimização da soma dos custos associados, cuja descrição se encontra detalhada de seguida. Definem-se i e j quaisquer nós representados na rede e ij como a ligação entre os nós i e j , com $i \neq j$.

a) Custo de construção de novos circuitos

- i. Variável binária de decisão em investimento de circuitos de i para j , com o condutor c .

$$\alpha_{ij,c}^L$$

- ii. Custo de construção do circuito de i para j , com condutor do tipo c .

$$C_{ij,c}^L$$

- iii. Custo total dos circuitos, na condição de i e j pertencerem ao conjunto de circuitos novos, e c pertencente ao conjunto do tipo de condutores

$$\sum_{ij,c \in \Omega^N} \sum_{c \in \mathcal{C}} \alpha_{ij,c}^L C_{ij,c}^L$$

b) Custo de construção de novas subestações

- i. Variável binária de decisão do investimento na subestação i .

$$\alpha_i^S$$

- ii. Custo de construção da subestação i

$$C_i^S$$

- iii. Custo total de construção das novas subestações, na condição de i e j pertencerem ao conjunto de circuitos novos, e c pertencente ao conjunto do tipo de condutores

$$\sum_{i \in A^S} \alpha_i^S C_i^S$$

- c) Custos com perdas de potência ativa em circuitos novos e circuitos existentes

- i. Custos com perdas de potência na ligação ij

$$C_L^P$$

- ii. Perdas $R \times I^2$

$R_{ij,c}^{EN}$ – Resistência da ligação existente / nova ij , do condutor tipo c

$(I_{ij,c}^{EN})^2$ – Corrente na ligação existente / nova ij , do condutor tipo c

- iii. Custos decorrentes de perdas na condição de ij pertencer ao conjunto de ligações novas e c pertencer ao conjunto do tipo de condutores

$$C_L^P \sum_{ij \in \Omega^{EN}} \sum_{c \in C} R_{ij,c}^{EN} (I_{ij,c}^{EN})^2$$

Observação: Uma vez que os circuitos existentes no local em estudo se encontram novos, dado ter ocorrido uma reabilitação dos mesmos em 2011, considerou-se a título simplificador para efeito de custo para com as perdas ativas, que os circuitos existentes \approx Circuitos novos

- d) Custo de operação nas subestações

- i. V^{nom} – Tensão nominal

C_i^0 – Custo operação subestação

I_i^S – Corrente na subestação

- ii. : Custo total de operação na condição de i pertencer ao conjunto de subestações existentes e propostas.

$$V^{nom} \sum_{i \in A^S} I_i^S C_i^0$$

e) Custo de seletividade do sistema

i. K – Custo Seletividade

R_i – Seletividade barramento i

ii. Custo total na condição de i pertencer ao conjunto de subestações existentes e propostas.

$$K \sum_{i \in B} R_i$$

A função objetivo, minimização dos custos totais, fica definida pela Equação 1:

Equação 1 - Função minimização

$$\begin{aligned} \min(x) = & \sum_{ij,c \in \Omega^N} \sum_{c \in C} \alpha_{ij,c}^L C_{ij,c}^L + \sum_{i \in A^S} \alpha_i^S C_i^S + C_L^P \sum_{ij \in \Omega^{EN}} \sum_{c \in C} R_{ij,c}^{EN} (I_{ij,c}^{EN})^2 + V^{nom} \sum_{i \in A^S} I_i^S C_i^0 \\ & + K \sum_{i \in B} R_i \end{aligned}$$

A construção de linhas aéreas de transporte de energia está sujeita a alguns fatores diretos e indiretos que influenciam o valor final do investimento. Como fatores diretos podemos destacar a tensão a que a linha vai ser estabelecida, número e secção dos condutores. Quanto aos fatores indiretos temos a altura dos apoios, as suas fundações e maciços ou mesmo as características do traçado da linha, onde quanto maior a fiabilidade pretendida e segurança da mesma, maior será certamente o investimento final.

Baseado na abordagem apresentada na referência [Galvão, 2010], foi considerado que para efeito de cálculo de estimativa orçamental, de uma forma grosseira, o investimento necessário para a construção de linhas de transporte aéreas pode ser estimado a partir da tensão nominal pretendida para a linha, a secção e número de condutores por fase. Para linhas constituídas por dois circuitos, uma estimativa para o investimento a realizar poderá ser dada pela Equação 2:

Equação 2 - Equação custo novas linhas

$$K_{2x} \sim 60 + 0,4 U_n + 0,4 \sqrt[4]{n_2} \delta$$

onde K_{2x} é o investimento para uma linha aérea com dois circuitos, em k\$/km, U_n é a tensão nominal da linha, em kV, n_2 é o número de condutores por fase e δ é a secção efectiva dos condutores, em mm².

considerando,

Un	60,00
n2	2
δ	300

As escolhas da tensão U_n , número e secção dos condutores, foram feitas de acordo com o usualmente utilizado pela EDEL [EDEL, 2011].

Sendo o tema deste trabalho o estudo da aplicação de um modelo PLIM na expansão da rede elétrica em contexto real, num caso de estudo em Angola, foram tomadas algumas considerações de simplificação que pudessem de alguma forma tornar o estudo mais prático e conclusivo, abrindo então a possibilidade de a confirmar-se a eventual aplicação do modelo PLIM na expansão da rede elétrica se partir para um outro estudo mais aprofundado do custo real da sua expansão.

No presente trabalho foram assumidos como custos fixos os custos com a construção de uma nova subestação, custos com perdas de potência ativa, custo de operação nas subestações, e o custo de seletividade do sistema, pelo que a função minimização de estimativa de custo na expansão da rede elétrica poderá ser expressa pela Equação 3:

Equação 3 - Função minimização com custos fixos

$$\min(x) = \sum_{ij,c \in \Omega^N} \sum_{c \in C} \alpha_{ij,c}^L C_{ij,c}^L + \sum_{i=1}^n \text{Custos Fixos}$$

Como exemplo e para o custo fixo de construção de uma nova subestação, foi efetuado um levantamento do custo \$/MVA através de dados recolhidos de outros estudos,

nomeadamente [Soares, 2004], assumindo-se que o custo fixo para a construção de uma nova subestação é de 188.500,00 \$/MVA.

O valor considerado como custo fixo, foi também corroborado pelos dados obtidos da EDEL do custo com a construção de 8 subestações de 100 MVA, num projeto de reabilitação e expansão da rede MT/BT de Luanda-fase IV.

4.2.2 Restrições

Em qualquer problema de redes, há a considerar um conjunto de restrições e imposições genéricas, nomeadamente:

- Restrição de Potência (a soma das potências que saem da subestação deverá ser menor ou igual à capacidade da subestação (desprezando as perdas);
- Restrição de acordo com as leis da física, sustentadas no Princípio da Conservação de Energia e no Princípio de Quantidade de Carga Elétrica;
- Restrição de trânsito de potência nas linhas

No presente trabalho, foram considerados os seguintes conjuntos de restrições:

- Restrição de Potência (Tabela 9) (a soma das potências que saem da subestação deverá ser menor ou igual à capacidade da subestação (desprezando as perdas):

Tabela 9 - Restrições de Potência

$X_1 + X_{20} \leq 80$	$X_5 + X_{22} + X_{25} \leq 80$	$X_9 + X_{24} + X_{29} \leq 20$
$X_2 + X_{17} \leq 80$	$X_6 - X_{33} + X_{34} \leq 80$	$X_{26} + X_{27} + X_{38} \leq 80$
$X_3 + X_9 + X_{18} \leq 100$	$X_7 \leq 40$	$X_{12} + X_{15} + X_{16} \leq 120$
$X_4 + X_{10} + X_{19} \leq 40$	$X_8 - X_{36} \leq 40$	$X_{30} + X_{31} \leq 100$

- b) Restrição de acordo com as leis da física (Tabela 10), sustentadas no Princípio da Conservação de Energia e no Princípio de Quantidade de Carga Elétrica:

Tabela 10 - Restrições físicas e elétricas nas linhas

$X_1 + X_5 + X_{37} = 154,36$	$X_{21} = 6,8$
$X_2 + X_{12} = 122,4$	$X_{27} - X_{28} = 6,8$
$X_3 + X_{10} + X_{17} + X_{18} + X_{38} = 140,08$	$X_{28} \geq 6,8$
$X_4 + X_{19} + X_{20} = 53,72$	$X_{25} + X_{26} = 6,8$
$X_6 = 137,7$	$X_{22} - X_{23} + X_{24} = 6,8$
$X_7 + X_{16} = 55,76$	$X_{23} = 6,8$
$X_8 = 55,76$	$X_{34} + X_{36} = 6,8$
$X_9 = 8,16$	$X_{35} = 6,8$
$X_{17} + X_{18} = 6,8$	$X_{31} - X_{32} - X_{33} = 6,8$
$X_{15} = 6,8$	$X_{32} = 6,8$
$X_{19} + X_{20} - X_{21} = 6,8$	$X_{29} + X_{30} = 6,8$

- c) Restrição de trânsito de potência nas linhas (Tabela 11 e Tabela 12):

Tabela 11 - Restrições de trânsito de potência nas linhas

$X_{31} - X_{32} + X_{33} \geq 0$	$X_{33} \geq 60$
$X_{34} - X_{35} + X_{36} \geq 0$	$X_{16} \geq 50$
$X_{12} \geq 0$	$X_{31} \geq 90$
$X_{19} + X_{20} - X_{21} \geq 0$	$X_7 \geq 40$
$X_2 \geq 0$	$X_{36} \geq 16$
$X_1 - X_{37} \geq 0$	

Tabela 12 - Restrições de potência novas linhas

$X_{12 \text{ a } 38} \leq 860 Y_{12 \text{ a } 38}$	
--	--

De seguida é apresentado o modelo matemático completo

Modelo completo:

Equação 4 - Função minimização com custos fixos

$$\begin{aligned} \min Z = & \$4.043,52 \cdot Y_{12} + \$2.235,60 \cdot Y_{15} + \$6.366,60 \cdot Y_{16} + \$1.458,00 \cdot Y_{17} + \$1.458,00 \\ & \cdot Y_{18} + \$2.109,24 \cdot Y_{19} + \$2.284,20 \cdot Y_{20} + \$874,80 \cdot Y_{21} + \$4.033,80 \cdot Y_{22} \\ & + \$2.721,60 \cdot Y_{23} + \$8.748,00 \cdot Y_{24} + \$2.118,96 \cdot Y_{25} + \$1.389,96 \cdot Y_{26} \\ & + \$1.117,80 \cdot Y_{27} + \$1.205,28 \cdot Y_{28} + \$7.027,56 \cdot Y_{29} + \$4.860,00 \cdot Y_{30} \\ & + \$1.798,20 \cdot Y_{31} + \$1.117,80 \cdot Y_{32} + \$2.673,00 \cdot Y_{33} + \$2.624,40 \cdot Y_{34} \\ & + \$1.817,64 \cdot Y_{35} + \$3.402,00 \cdot Y_{36} + \$1.020,60 \cdot Y_{37} + \$3.888,00 \cdot Y_{38} \\ & + \$15.080.000,00 + \$18.850.000,00 + \$22.620.000,00 \end{aligned}$$

Sujeito a:

$X_1 + X_{20} \leq 80$	$X_{28} = 6,8$
$X_2 + X_{17} \leq 80$	$X_{25} + X_{26} = 6,8$
$X_3 + X_9 + X_{18} \leq 100$	$X_{22} - X_{23} + X_{24} = 6,8$
$X_4 + X_{10} + X_{19} \leq 40$	$X_{23} = 6,8$
$X_5 + X_{22} + X_{25} \leq 80$	$X_{34} + X_{36} = 6,8$
$X_6 - X_{33} + X_{34} \leq 80$	$X_{35} = 6,8$
$X_7 \leq 40$	$X_{31} - X_{32} - X_{33} = 6,8$
$X_8 - X_{36} \leq 40$	$X_{32} = 6,8$
$X_9 + X_{24} + X_{29} \leq 20$	$X_{29} + X_{30} = 6,8$
$X_{26} + X_{27} + X_{38} \leq 80$	—
$X_{12} + X_{15} + X_{16} \leq 120$	$X_{31} - X_{32} + X_{33} \geq 0$
$X_{30} + X_{31} \leq 100$	$X_{34} - X_{35} + X_{36} \geq 0$
—	$X_{12} \geq 0$
$X_1 + X_5 + X_{37} = 154,36$	$X_{19} + X_{20} - X_{21} \geq 0$
$X_2 + X_{12} = 122,4$	$X_2 \geq 0$
$X_3 + X_{10} + X_{17} + X_{18} + X_{38} = 140,08$	$X_1 - X_{37} \geq 0$
$X_4 + X_{19} + X_{20} = 53,72$	—
$X_6 = 137,7$	$X_{33} \geq 60$
$X_7 + X_{16} = 55,76$	$X_{16} \geq 50$
$X_8 = 55,76$	$X_{31} \geq 90$
$X_9 = 8,16$	$X_7 \geq 40$
$X_{17} + X_{18} = 6,8$	$X_{36} \geq 16$
$X_{15} = 6,8$	$X_{12} \text{ a } 38 \leq 860 \text{ } Y_{12} \text{ a } 38$
$X_{19} + X_{20} - X_{21} = 6,8$	$X_1 \text{ a } X_{38} \geq 0$
$X_{21} = 6,8$	$Y_{12} \text{ a } Y_{38} \text{ binárias}$
$X_{27} - X_{28} = 6,8$	

4.3 Ferramentas de resolução do problema

Para implementação do caso de estudo, foram utilizados dois Softwares de otimização, CPLEX, e a Plataforma Analytic Solver, num computador de marca Dell com um processador Intel® Core™ 2 Duo CPU E4500 @ 2.20 Hz 2,19 GHz e 2 Gb de memória RAM.

Primeiramente foi utilizado o *software* Solver do Excel, visto ser uma ferramenta de fácil acesso e relativamente de fácil utilização. Contudo, o Solver do Excel é limitado no tamanho do problema que possa ser solucionado, sendo as ferramentas propostas potencialmente mais interessantes, no entanto mais difíceis de utilizar. Face à possibilidade do presente estudo vir a ser utilizado em Angola e para uma expansão de dimensão superior, considerou o autor a importância do investimento na aprendizagem de novas ferramentas de otimização.

4.3.1 Analytic Solver Platform

A Plataforma Analytic Solver (Figura 14) incorpora muitos dos algoritmos mais poderosos para a otimização e simulação de dados disponível e explora a nova tecnologia em CPUs, GPUs e servidores em nuvem, permitindo um maior grau de funcionalidades que alguns dos designados "*software* de análise de empresa" que poderão custar 5 a 10 vezes mais.

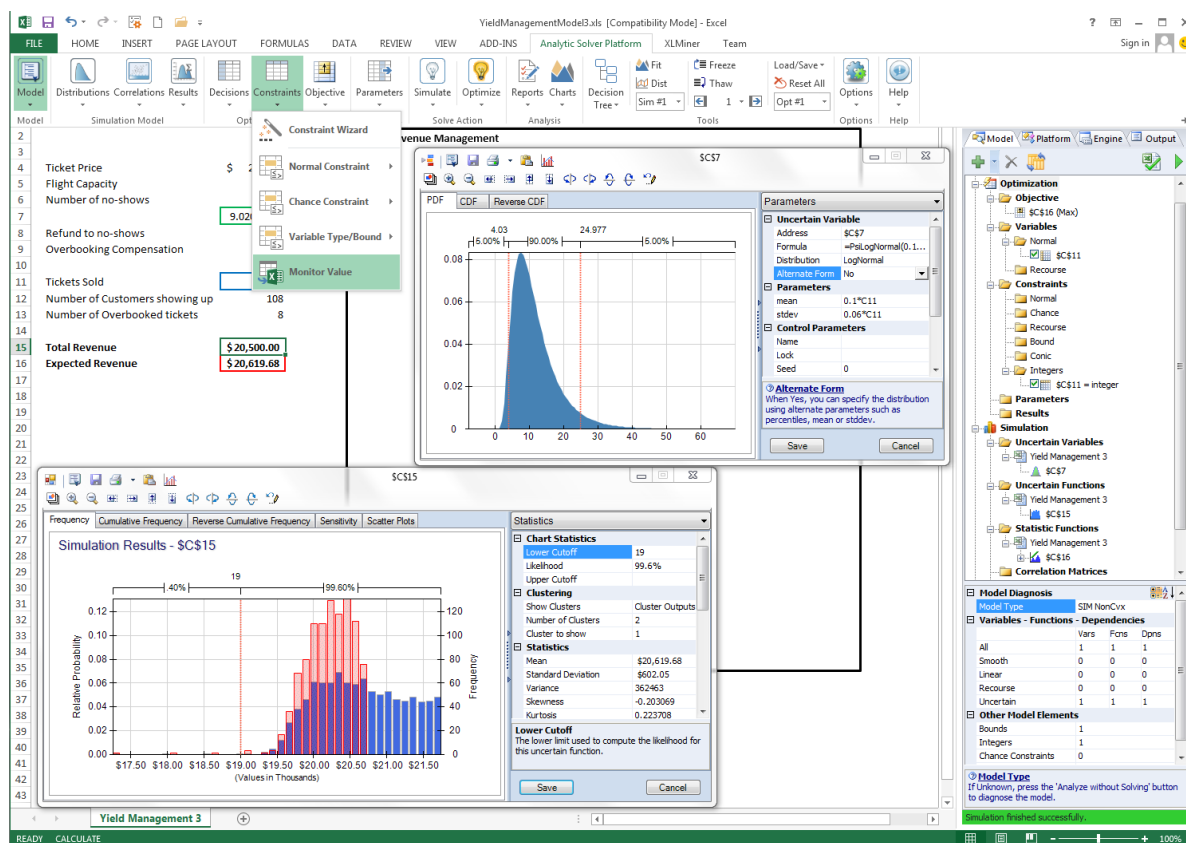


Figura 14 - Analytic Solver Platform

Solvers do Frontline Microsoft Excel ® são compatíveis com a Plataforma Analytic Solver, permitindo que a introdução dos dados possa ser de forma mais simples e rápida, assim como a aplicação da Plataforma Analytic Solver em estudos de otimização anteriormente realizados apenas com os *solvers* disponíveis no Microsoft Excel®. As principais vantagens na utilização da Plataforma Analytic Solver, são de permitir resolver problemas maiores do que o Solver Excel básico, com velocidades mais rápidas, assim como resolver completamente outro tipo de problemas.

A Plataforma Analytic Solver (Figura 26) é o primeiro *software* com a capacidade para análise e exploração visual de dados de ensaios de simulação de Monte Carlo, com resultados em histogramas, gráficos, e estatísticas descritivas resumindo os resultados da simulação, sem limitações recorrendo a ferramentas algorítmicas de XLMiner disponíveis para análise de dados de ensaios de simulação colocados numa folha de excel.

No **Anexo I** encontram-se os principais passos para a resolução de um problema de otimização pelo *software*.

4.3.2 CPLEX

A sigla CPLEX é a combinação da letra C, referindo-se à linguagem de programação C utilizada no desenvolvimento deste algoritmo, e a terminação PLEX, em referência ao algoritmo simplex de solução de problemas de programação linear.

Os algoritmos presentes no *software* da *IBM ILOG CPLEX Optimizer* (Figura 15), contêm *solvers* de alto desempenho matemático de programação para a programação linear, programação inteira mista, programação quadrática, e os problemas de programação quadrática com restrições, permitindo também a resolução dos problemas com milhões de restrições e variáveis.

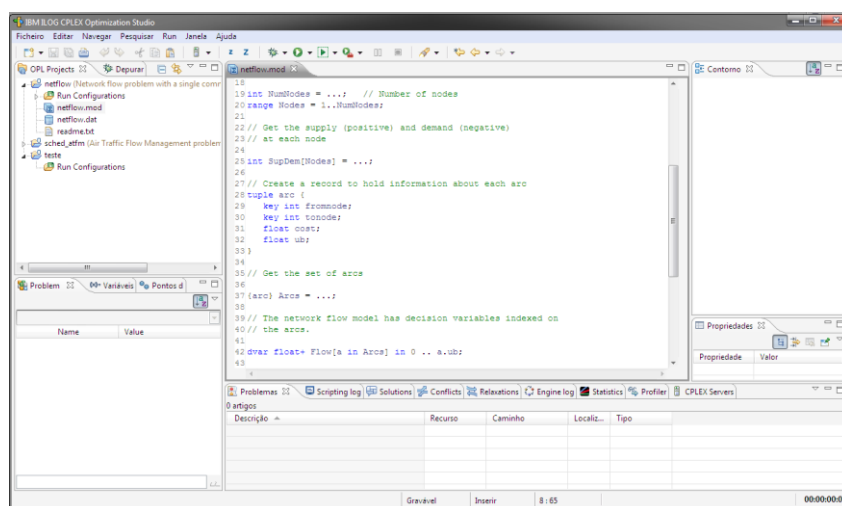


Figura 15 - Software CPLEX

No **Anexo II** encontram-se os principais passos para resolução de um problema de otimização no *software* CPLEX.

Capítulo 5

Apresentação e Análise de Resultados

5.1 Caso de Estudo

O presente caso de estudo foi realizado em Angola, com dados reais e aplicados a um caso real da cidade de Luanda. Da totalidade de subestações, linhas de transmissão e postos de transformação, e de forma a tornar possível o cálculo computacional de um modelo matemático linear aplicado à distribuição de energia elétrica, foram selecionadas as subestações, linhas de transmissão e postos de transformação que se encontram em serviço e cujos dados são conhecidos e válidos (**Anexo III**).

Na Figura 16 estão identificadas geograficamente as subestações na cor amarela e postos de transformação existentes e em exploração na cor vermelha. Na Figura 17 é representada a localização proposta para a instalação de novas subestações e postos de transformação na cor verde.

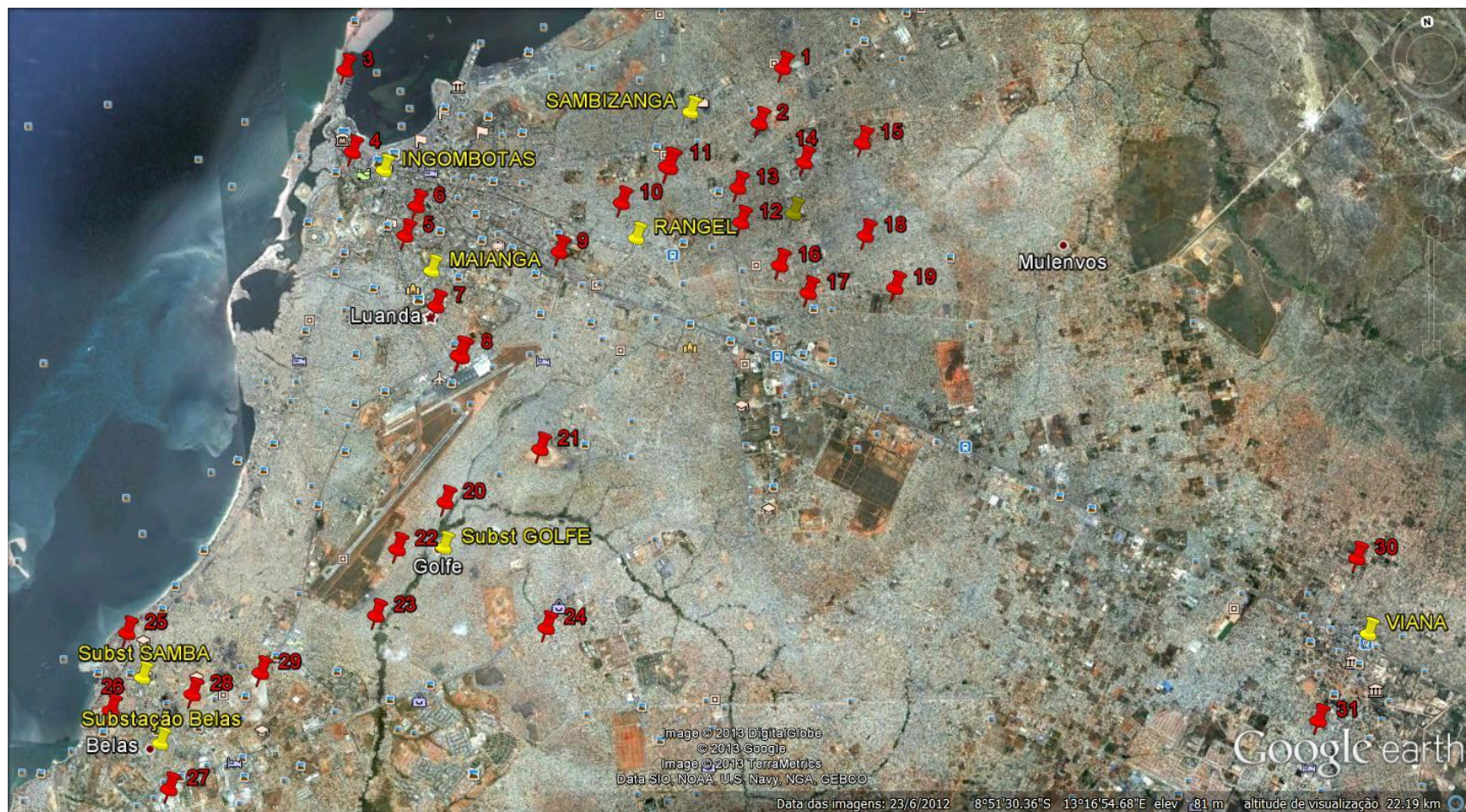


Figura 16 - Localização em mapa das subestações e PT's em exploração



Figura 17 - Localização em mapa das subestações e PT's em exploração e propostos

5.1.1 Sistema de Teste

Identificadas todas as variáveis e definidas perfeitamente todas as restrições de cálculo, procedeu-se à elaboração da matriz de dados de entrada (Figura 18) de forma a ser possível a implementação na Plataforma Analytic Solver e CPLEX (**Anexo IV**).

Foram assinaladas a amarelo as variáveis que queremos que o *software* calcule, assim como a célula onde deverá ser apresentado o resultado final da função objetivo.

Definida a célula objetivo, e uma vez que se procurou a minimização de custos de produção, custo de transporte de energia, etc., selecionou-se no campo respetivo a opção mínimo. De seguida foram adicionadas todas as restrições consideradas.

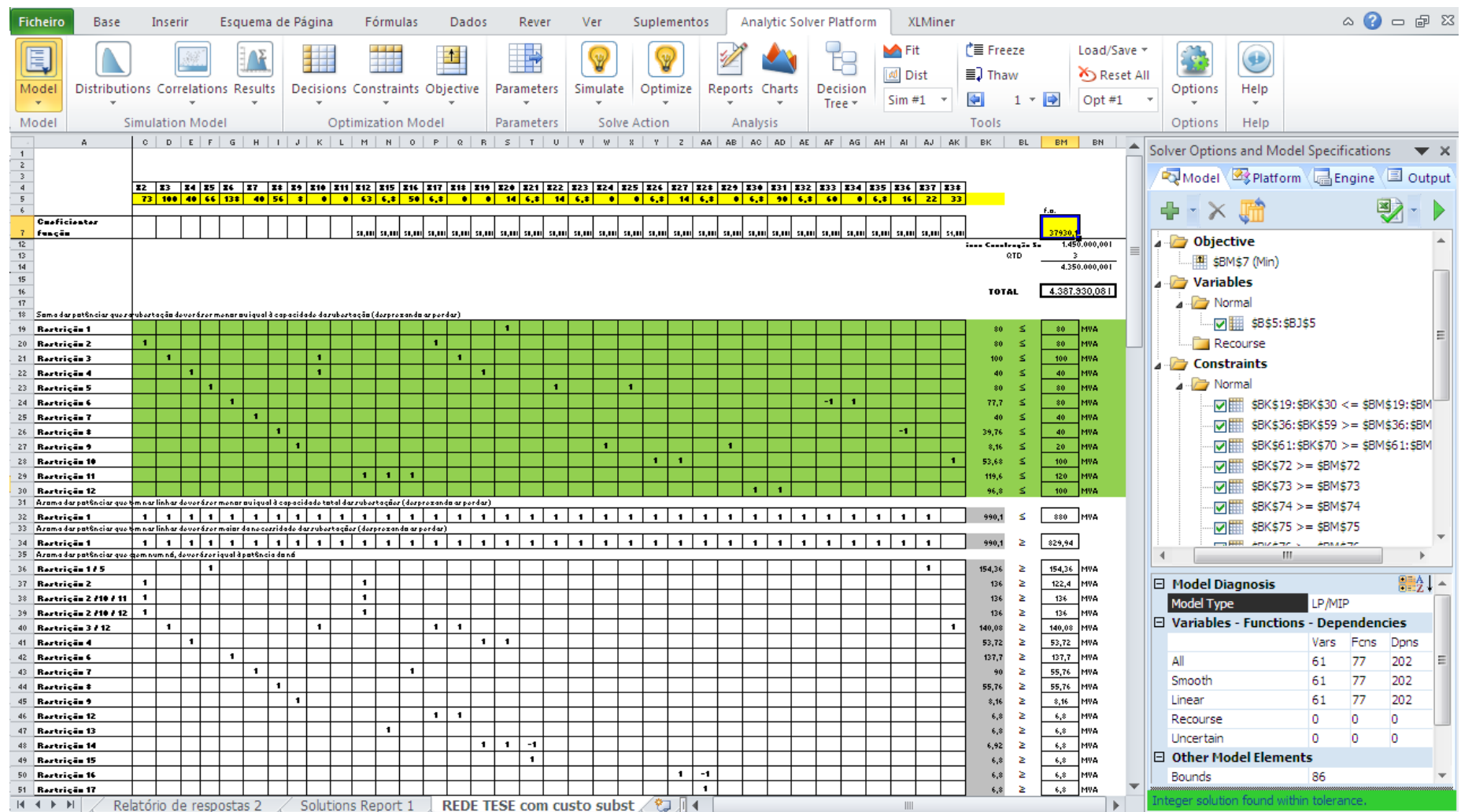


Figura 18 - Implementação software Analytic Solver Platform

5.1.2 Análise de Resultados

Após inserção de todos os dados, e executado o *software*, são apresentados pelo Analytic Solver Platform e pelo CPLEX, os resultados ilustrados na Figura 19 e na Figura 20:

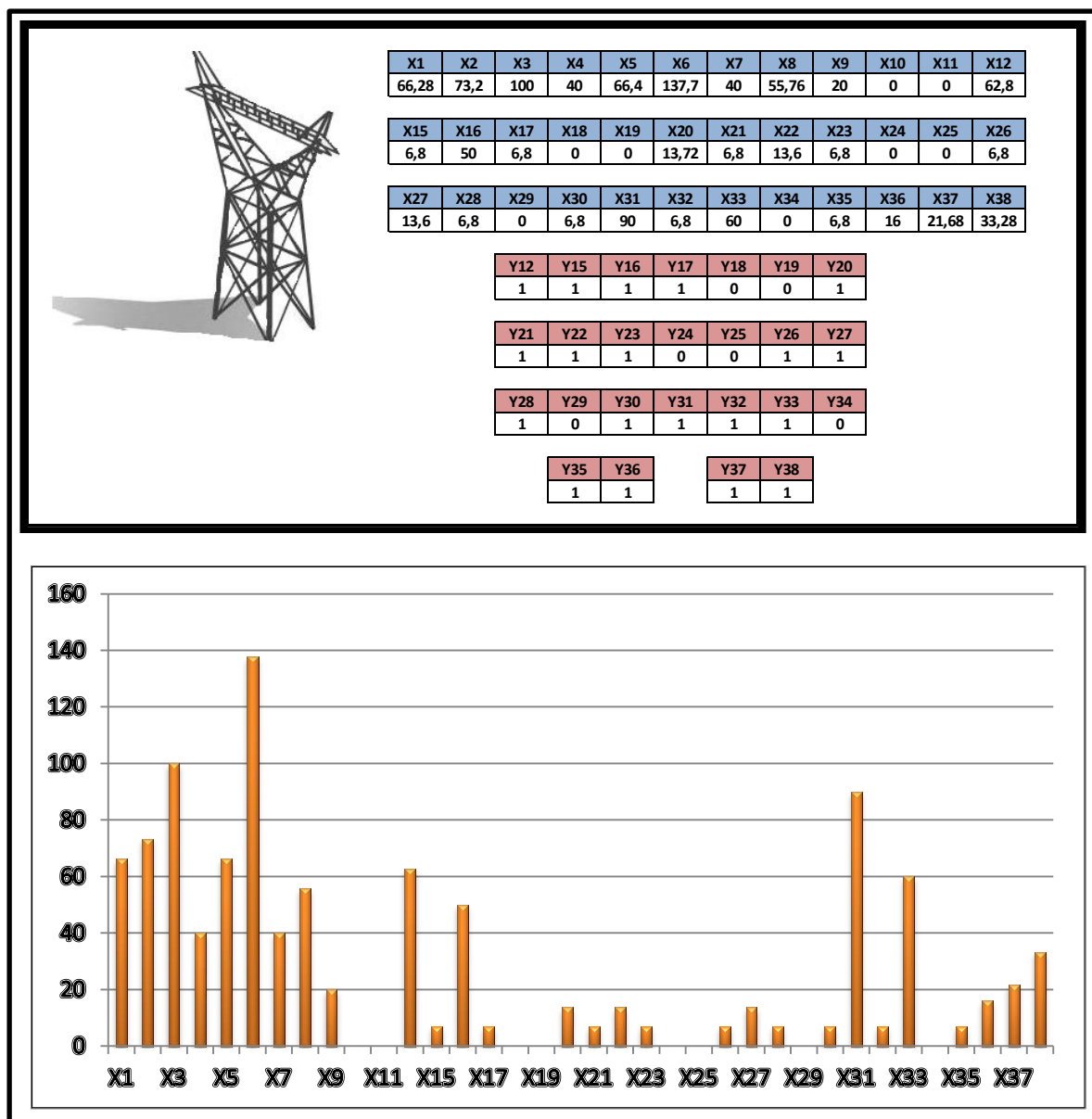


Figura 19 - Resultados *software* Analytic Solver Platform

Como pode ser verificado, o *software* concluiu que a solução otimizada para fornecimento de energia elétrica à totalidade dos pontos de consumo, nas quantidades

solicitadas, é viável para a introdução de três novas subestações e de 19 linhas de transmissão de energia elétrica do que as inicialmente propostas.

Na rede de teste introduzida na plataforma Analytic Solver e CPLEX (Figura 20), tinham sido consideradas 34 linhas de transmissão de energia elétrica. Os *softwares* otimizaram o sistema de transmissão de energia elétrica, propondo suprir todas as necessidades elétricas dos pontos de consumo com menos 6 linhas de transmissão de energia elétrica.

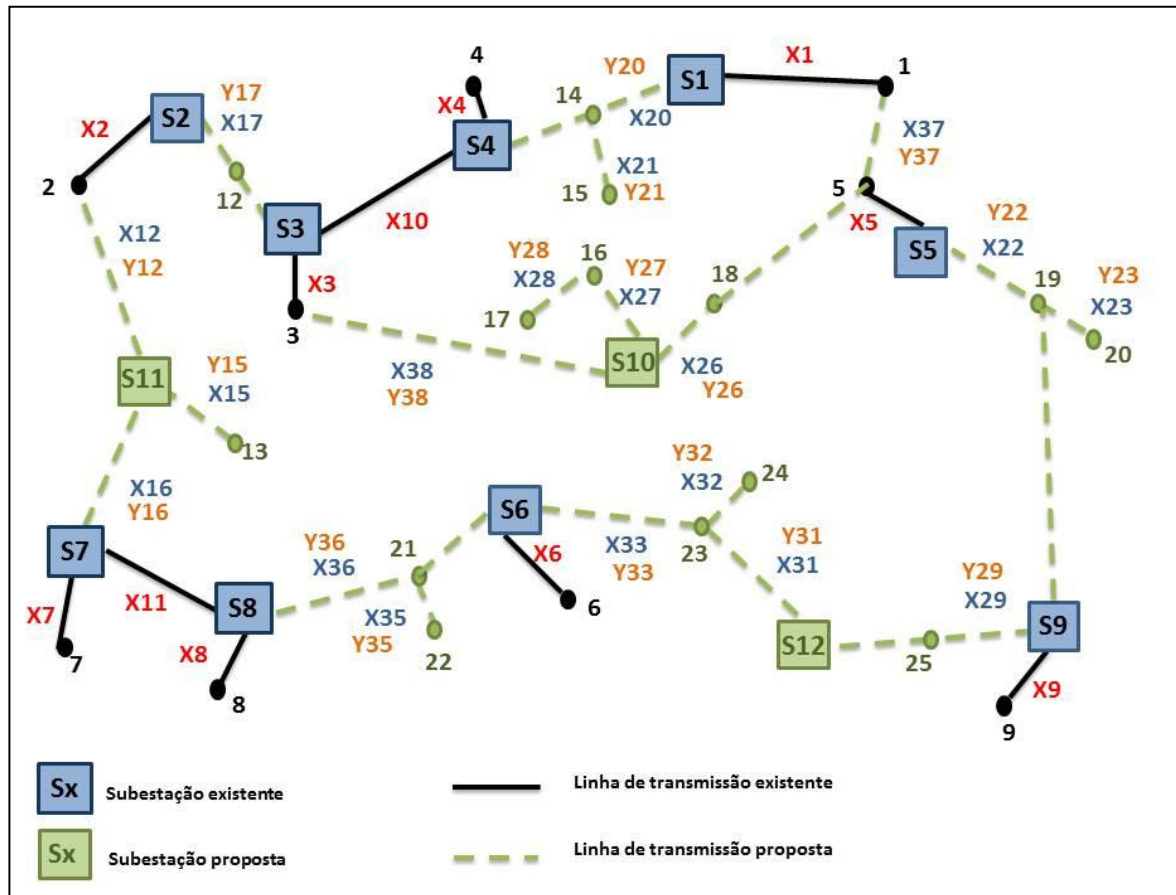


Figura 20 - Rede proposta antes da aplicação do software

Na cor vermelha na Figura 21, estão assinaladas as linhas que, tendo sido propostas no modelo inicial, não deverão existir na solução ótima (linhas 18, 19, 24, 25, 29 e 34).

Verifica-se então que o ponto de consumo número 12 será alimentado pela subestação S2, os pontos números 14 e 15 pela subestação S1, ponto número 18 pela subestação S10, pontos número 19 e 20 pela subestação S5, pontos número 21 e 22 pela subestação S8 e ponto número 25 pela subestação S12.

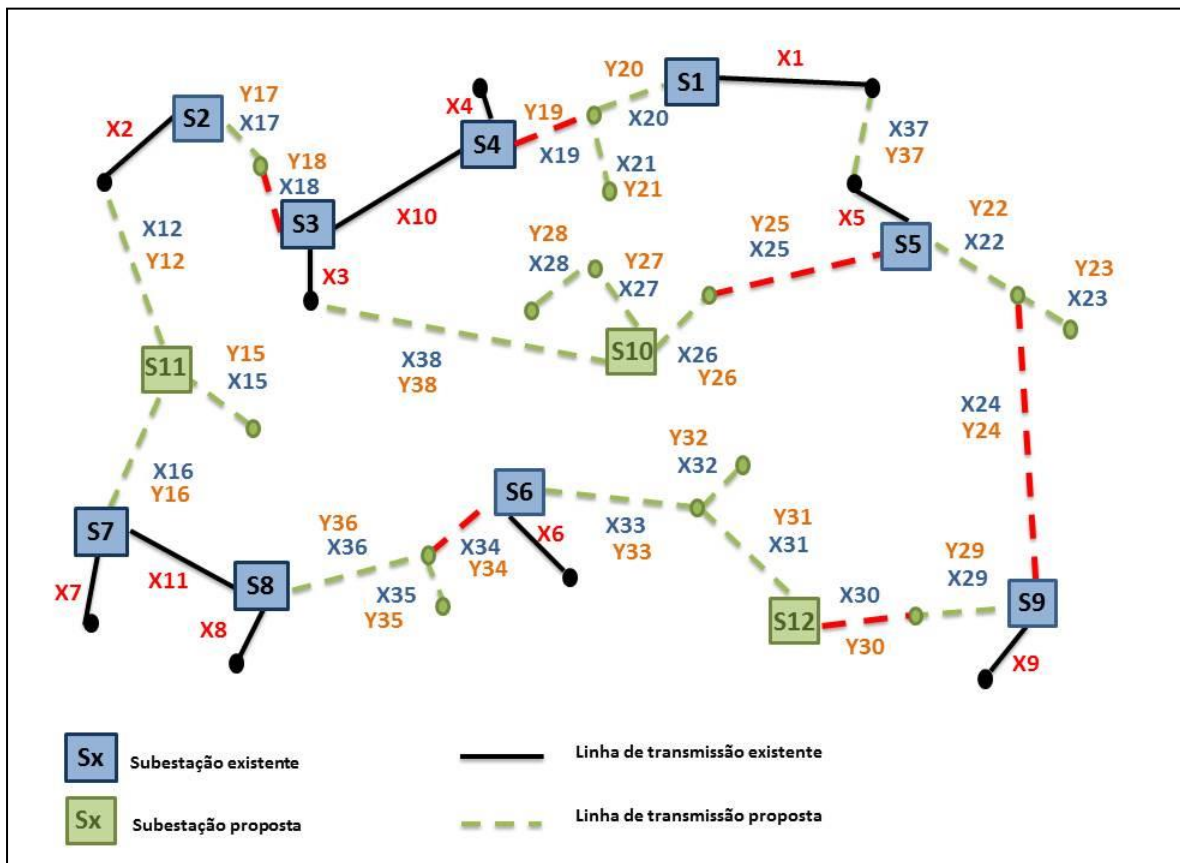
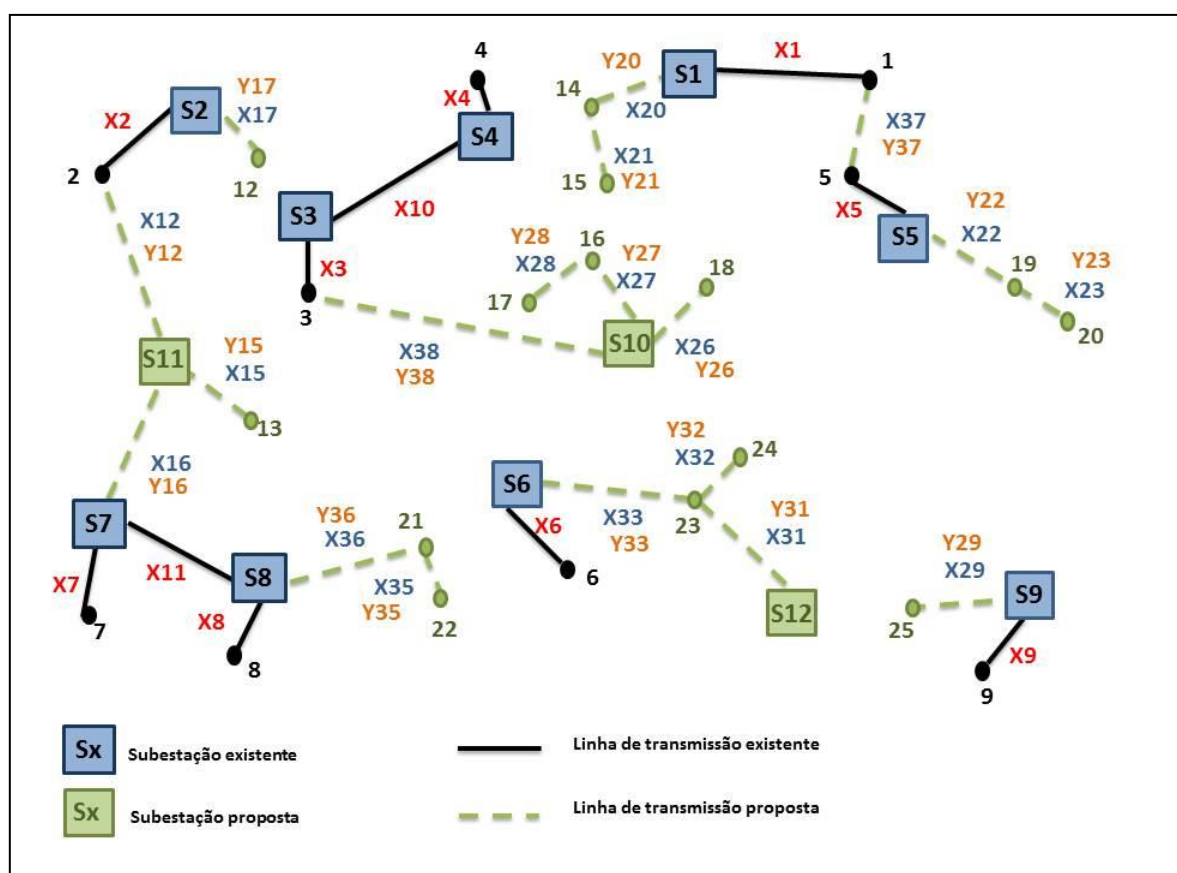


Figura 21 - Resultado da rede (software)

De seguida na Figura 22 representa-se a rede de distribuição de energia elétrica, resultante após resolvido o modelo matemático.



De seguida na Tabela 13 é feita a reanálise do cumprimento de supressão das necessidades de energia elétrica de cada um dos pontos de consumo, a partir do fornecimento de energia por cada uma das subestações existentes e propostas instalar (Tabela 14)

Tabela 13 - Resultado pontos de consumo e suas necessidades de potência

Ponto de consumo	Nº Postos de Transformação em serviço	Potência total consumo (MVA)	Potência Disponível (MVA)	Diferencial
1	87	69,6	69.6	0
2	180	144	144	0
3	196	156,9	156.9	0
4	79	63,2	63.2	0
5	140	112	112	0
6	203	162	162	0
7	82	65,6	65.6	0
8	82	65,6	65.6	0
9	12	9,6	20	10,4
12 a 25	10	104	104	0

Nota: Postos de transformação de 800 kVA em funcionamento a 85% da sua capacidade total

Tabela 14 - Potência a disponibilizar por cada subestação

Subestação	Potência total (MVA)	Potência a Disponibilizar (MVA)	Diferencial
1	80	80	0
2	80	80	0
3	100	100	0
4	40	40	0
5	80	80	0
6	80	77,7	2,7
7	40	40	0
8	40	39,76	0,24
9	20	20	0
10 (nova)	80	53,68	26,32
11 (nova)	120	119,6	0,4
12 (nova)	100	96,8	3,2

5.2. Validação da solução encontrada

A procura da solução ótima foi desenvolvida de acordo com o fluxograma representado na Figura 23. Para uma melhor leitura visual e validação dos resultados obtidos, do funcionamento da rede elétrica estudada no caso de estudo acima descrito, foi implementada a rede no software simulador PowerWorld 8.0 OPF, software este que permite a simulação da operação do sistema de trânsito de potências de forma gráfica e interativa, por um período de tempo que pode variar desde alguns minutos até vários dias.

O *software* PowerWorld 8.0 OPF contém um pacote de análise de fluxo de energia altamente eficaz, capaz de resolver de forma eficiente os sistemas de até 100 mil barramentos. No presente validação foi utilizada a ferramenta *Optimal Power Flow* (OPF), cuja função é de minimizar uma função objetivo (ou custo), em que o Simulator OPF ou o algoritmo OPF Programação Linear (LP OPF) determinam a solução ideal por iteração entre a solução de um fluxo de potência *standard* sem violar as respetivas restrições limite.

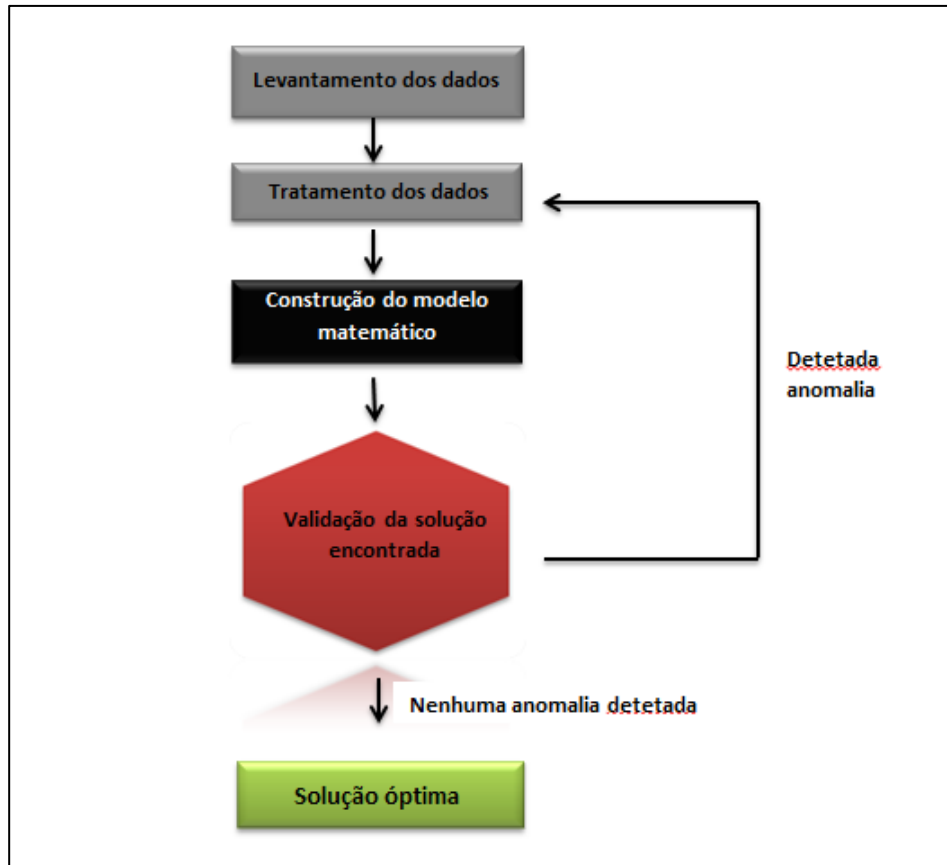


Figura 23 - Fluxograma procura solução ótima

Após corrido o simulador *PowerWorld 8.0 OPF* com a rede inicialmente proposta (Figura 24), desativaram-se os ramos (linhas de transmissão de energia elétrica) consideradas pelos *softwares* de otimização CPLEX e Analytic Solver Platform como desnecessários, ao cumprimento do garantir de fornecimento de energia elétrica a todos os pontos de consumo existentes e propostos.

De seguida voltou-se a correr o simulador *PowerWorld 8.0 OPF*, tendo-se a rede ajustado automaticamente e sem violação de restrições limite (Figura 25), o que permitiu validar a solução encontrada pelos *softwares* de otimização CPLEX e Analytic Solver Platform.

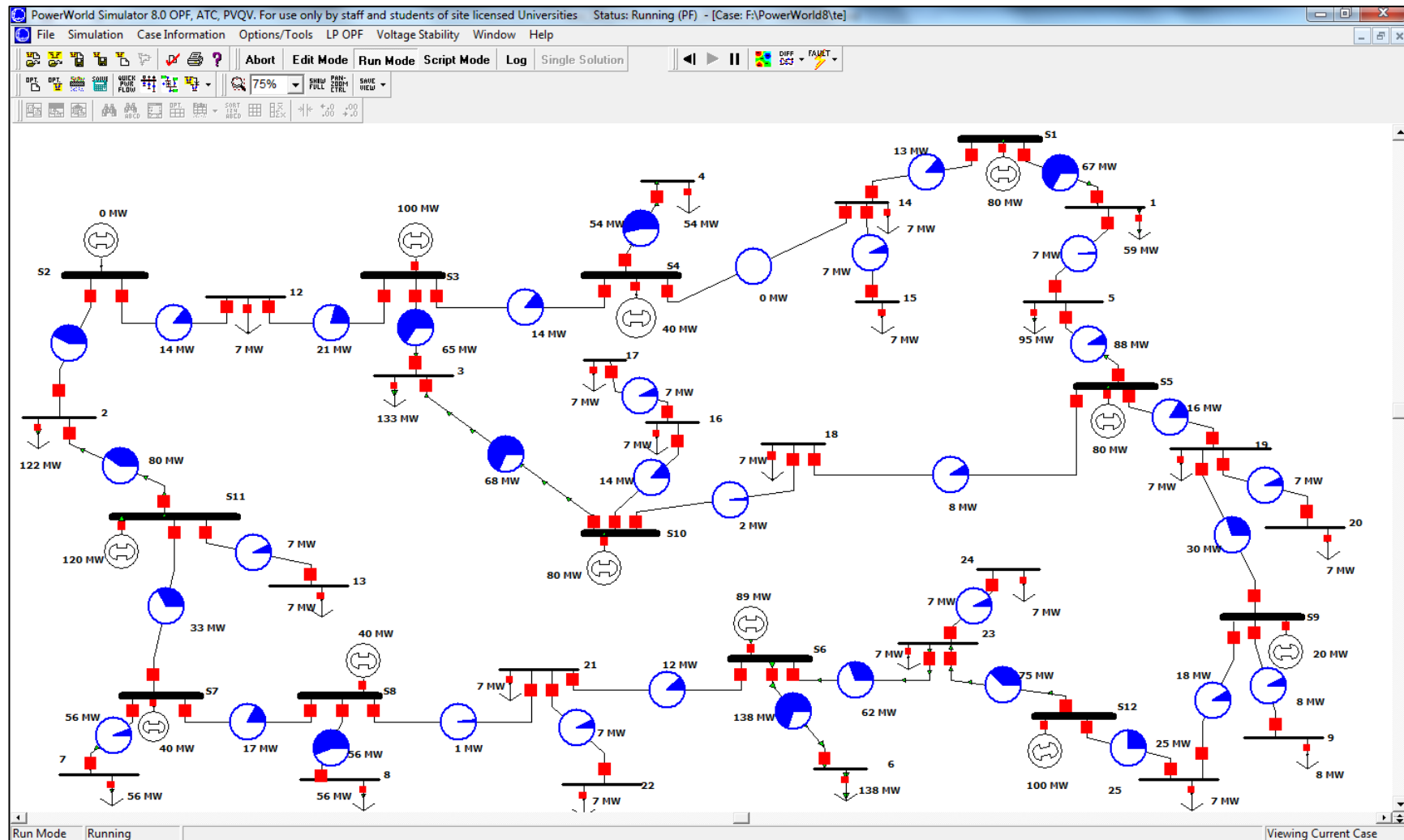


Figura 24 - Implementação da rede em estudo no simulador software PowerWorld

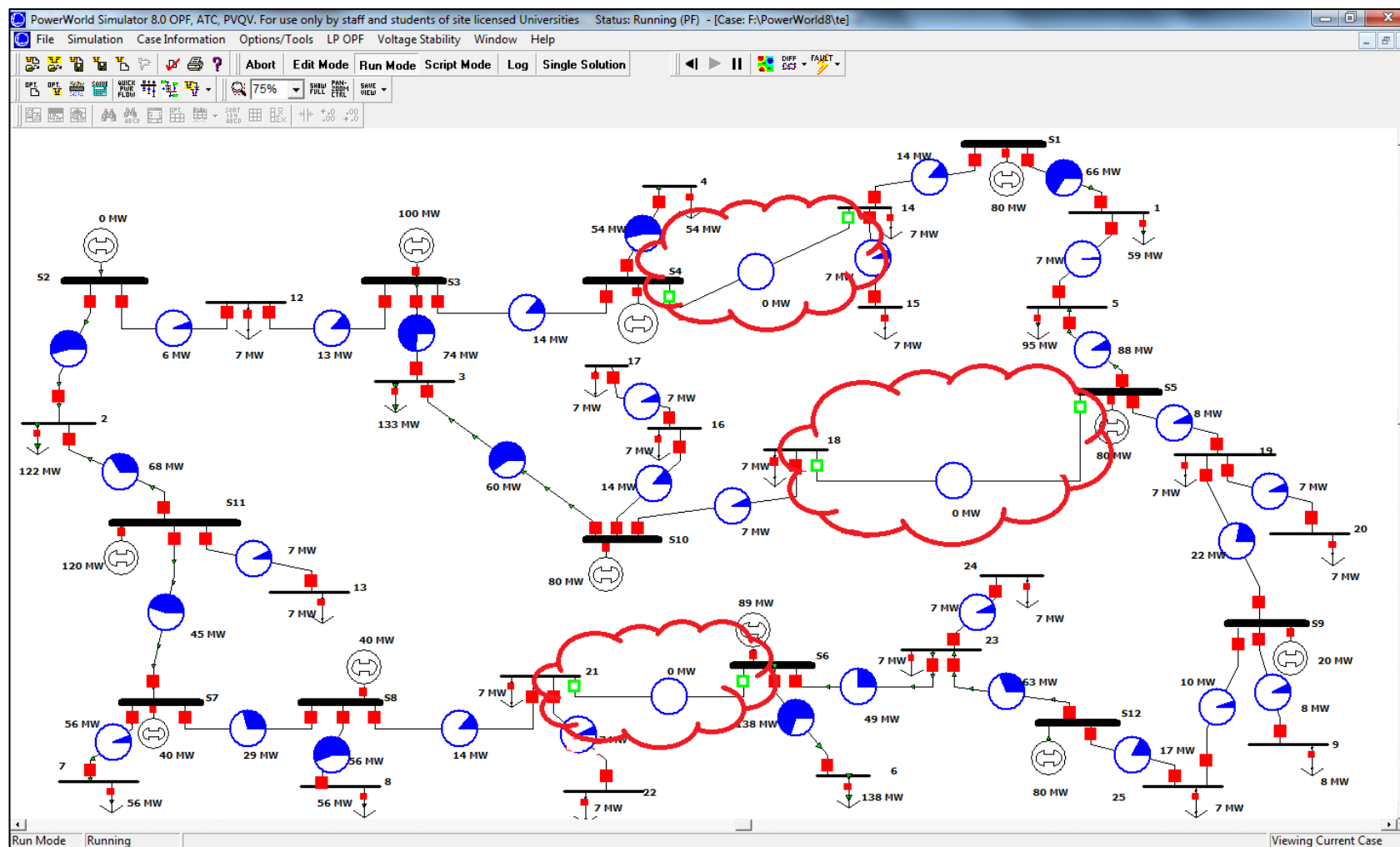


Figura 25 - Implementação no PowerWorld da rede resultante do *software* otimização

Capítulo 6

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1 Conclusões

O setor energético em Angola foi definido pelo governo como um eixo prioritário até 2016. Apesar de já ter sido executado um volume importante de investimentos na rede de distribuição de energia elétrica de Angola, com a implantação de várias instalações elétricas, é aceitável pressupor que a oferta de eletricidade esteja aquém do valor da procura a nível da Cidade de Luanda, quer devido ao aumento considerável do número de novos edifícios, centros comerciais, agências bancárias, pequenas e médias indústrias, como das necessidades crescentes de climatização.

Atualmente podemos verificar que grande parte dos pontos de consumo existentes no local em estudo não são providos de rede de energia elétrica, por exemplo, exemplo locais como Samba, Cazenga, Rangel, Kilamba Kiaxi, Maianga e Ingombotas.

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma proposta de estudo introdutório da expansão da rede elétrica existente atualmente na capital de Angola, Luanda, baseando-se em dados reais. Procurou-se uma solução viável à resolução de alguns problemas de fornecimento de energia elétrica, numa tentativa de poder contribuir para a melhoria do bem-estar das pessoas locais.

Os modelos lineares de planeamento da expansão de redes elétricas, baseados em técnicas convencionais de programação matemática, face à dimensão dos problemas em contexto real e dos variadíssimos fatores a ter em conta simultaneamente e que dependem entre si, poderão ser algo limitados na otimização de redes cujo dimensionamento e funcionamento é já muito próximo do ideal. No entanto, os resultados alcançados são promissores e permitem justificar a aplicação de um modelo PLIM na representação do problema de expansão desta rede elétrica em particular, em relação a técnicas mais sofisticadas de planeamento da expansão de redes elétricas noutro tipo de países, cuja procura por satisfazer não atinge os valores de Luanda.

Os *softwares* CPLEX e Analytic Solver Platform utilizados na implementação do modelo de PLIM desenvolvido permitiram a otimização de uma decisão, de forma melhorada no que respeita a satisfação da procura, minimizando os custos e garantindo todas as restrições.

Na rede de teste introduzida na plataforma Analytic Solver e CPLEX, tinham sido consideradas 34 linhas de transmissão de energia elétrica, procurando colmatar uma das falhas do sistema atual de fornecimento de energia elétrica. As subestações e linhas existentes não são suficientes para abastecer os pontos de consumo, assim como vários pontos de consumo não são ainda providos de energia elétrica, pelo que se procurou a partir da análise geográfica habitacional aumentar o número de subestações e de postos de transformação.

A solução proposta permite suprir todas as necessidades elétricas dos pontos de consumo com menos 6 linhas de transmissão de energia elétrica que o inicialmente considerado.

Estando previsto pela EDEL alimentar por cada posto de transformação de 800 kVA um total de 300 clientes, a solução ótima encontrada permite concluir que será possível, com uma solução de reestruturação da rede existente, alimentar não só a totalidades dos PT's atualmente existentes e a funcionar, e que até então não eram totalmente alimentados, aumentando o número de habitações a serem alimentadas eletricamente que até então estavam providas do fornecimento de energia elétrica.

6.2 Trabalhos Futuros

Poderá considerar-se, num trabalho futuro, uma extensão da aplicação do modelo matemático à totalidade da rede elétrica nacional de Angola, programado num *software* base para tal capacidade como por exemplo o Matlab.

No presente trabalho, foram assumidos como custos fixos os custos com a construção de uma nova subestação, custos com perdas de potência ativa e custo de operação nas subestações. Num trabalho futuro e para um aumento do realismo do valor final de cada alteração proposta, estes custos poderiam ser considerados variáveis.

Considera também o autor que seria interessante a abordagem do caso de estudo analisado na presente dissertação com modelos estocásticos, considerando a procura como variável aleatória com uma distribuição de probabilidade definida.

Acrescenta-se apenas que no modelo atual é facilmente incorporada qualquer alteração ou restrição nova, pois todos os passos foram devidamente comentados.

REFERÊNCIAS

- [Adams and Laughton, 1974] Adams, R.N. and Laughton, M.A., "*Optimal Planning of Power Networks Using Mixed Integer Programming*", Proc. IEEE, Vol.121, No.2, pp. 139-147, February (1974).
- [AIE, 2006] "ANGOLA Desenvolvimento de uma estratégia para a energia", Agência Internacional de Energia, 2006
- [BES, 2013] "*Natural resources and growth*", Africa Sector Outlook, May 2013.
<http://www.bes.pt>
- [Cardoso, 2011] Cardoso, E.M., "*Simulação de sistemas energéticos isolados. Ilha de Santiago*", Dissertação de mestrado, DEM, UA, 2011.
- [Chinwuko, et al, 2012] Chinwuko, C.E., Chukwuneke, J.L., Okolie, P.C. and Dara, E.J., "*Modeling and Optimization of Electricity Distribution Planning System Using Dynamic Programming Techniques: A Case of Power Holding Company of Nigeria (PHCN)*", International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, VOL. 3, NO. 6, June 2012.
- [Cossi and Silva, 2011] Cossi, A.M., Silva, L.G., "Modelo de otimização multiobjetivo de redes de distribuição de energia elétrica de média tensão (MT)", XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Agosto 2011
- [Crawford and Holt, 1975] Crawford, D.M. and Holt, S.B., "*A Mathematical Optimization Technique for Locating and Sizing Distribution Substations and Deriving Their Optimal Service Areas*", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS. 94, No. 2, pp. 230-235, April (1975).
- [Diabinho, et al, 2009] Diabinho, A., Santos, C., Messias, R., Matusiwa, L., Ferreira, A.L., Carvalho, P., "*Re-power a distribution network with a rapidly changing level of demand through simulation technology*", 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2009), January 2009 page 213
- [EDEL, 2011] Relatório de contas EDEL 2011, <http://www.edel.co.ao>, disponível em Junho 2013

- [Galvão, 2010] Galvão, Cláudio “*Redes eléctricas de média e baixa tensão. Aspectos de projecto, licenciamento e exploração em contexto operacional.*” Dissertação de Mestrado, Junho de 2010.
- [Gönen and Foote, 1981] Gönen, T. and Foote, B.L., “*Distribution System Planning Using Mixed-Integer Programming*”, Proc. IEE, Vol. 128, Pt.C., No. 2, pp. 70-79, March (1981).
- [Hammons, et al, 2000] Hammons, T.J., Blyden, B.K., Calitz, A.C., Gulstone, A.B., “*African electricity infrastructure interconnections and electricity exchanges*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, (Volume:15 , Issue: 4), Dec 2000
- [Karekezi, 2002] Karekezi, S., “*Renewables in Africa—meeting the energy needs of the poor*”, Energy Policy, Volume 30, Issues 11–12, September 2002, Pages 1059–1069
- [Knight, 1960] Knight, U.G.W., “*The Logical Design of Electrical Networks Using Linear Programming Methods*”, Proc. IEE, Vol. 107 A, pp. 306-316, (1960).
- [Leote, 2009] Leote, R., “*Eletrificação de serviços primários em povoados remotos africanos recorrendo a sistemas solares fotovoltaicos (PV)*”, Dissertação de mestrado, DEE-FCT-UNL, 2009.
- [Lima, 2011] Lima, J.M., “*Coordenação da atividade de fiscalização do grande projeto de aumento da capacidade de produção térmica da cidade de Luanda*”, Dissertação de mestrado, FCT-UNL, 2011.
- [MINEA, 2012] Programa de investimentos dos sectores eléctrico e águas, até 2016. Ministério da Energia e Águas – República de Angola, 2012. <http://www.minerg.gv.ao>, disponível em Julho de 2013
- [Monteiro, 2012] Monteiro, A.D., “*O Impacto das Energias Renováveis na Economia dos Países Emergentes – O Caso de Cabo Verde*”, ISCTE-IUL, 2012.
- [Oldfield and Lang, 1965] Oldfield, J.V. and Lang, M.A., “*Dynamic Programming Network Flow Procedure for Distribution System Planning*”, Proceeding Power Industry Computer Applications Conference, (1965)
- [Ponnavaikko, et al, 1987] Ponnavaikko, N., Rao, K.S.P. and Venkata, S.S., “*Distribution System Planning Through a Quadratic Mixed Integer Programming Approach*”,

- IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4, Oct. 1987, pp, 1157-1163.
- [Soares, 2004] Soares, J.L., “Optimização de áreas de serviço de subestações”, Dissertação FEUP, 2004
- [Sousa, et al, 2011] Sousa, J., Flores, M.J.R., Mantovani, J.R.S., “*Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica através de um modelo de otimização clássica*”, XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Agosto 2011
- [Toft, 2010] Toft, P., “*Terrorist targeting and energy security*”, Energy Policy, Volume 38, Issue 8, August 2010, Pages 4411–4421
- [Vaziri, et al, 2000 a)] Vaziri, M, Tomsovic, K and Gonen, T. “*Distribution Expansion Problem Revisited, PART 1: Categorical Analysis and Future Directions*”, IASTED – 4th International Conference on Power and Energy Systems Proceedings, Paper No. 319-155, pp. 283-290 (2000).
- [Vaziri, et al, 2000 b)] Vaziri, M, Tomsovic, K and Gonen, T. “*Distribution Expansion Problem Revisited, PART 2: Proposed Modeling and Formulation*”, IASTED Power and Energy Systems Proceedings, Paper No. 319-215, pp. 291-298 (2000).
- [Wolfe, 1963] “*Methods of nonlinear programming*”, in Recent Advances in Mathematical Programming (R.L.Graves e P . Wolfe eds.), McGraw Hill, New York, 67-86

Anexos

ANEXO I

XLMiner[®] para Windows[®] é a pesquisa de dados no formato add-in para Excel, com redes neurais, árvores de classificação e regressão, regressão logística, regressão linear, Bayes classificador K-vizinhos mais próximos, a análise discriminante, regras de associação, de agrupamento, componentes principais, etc..

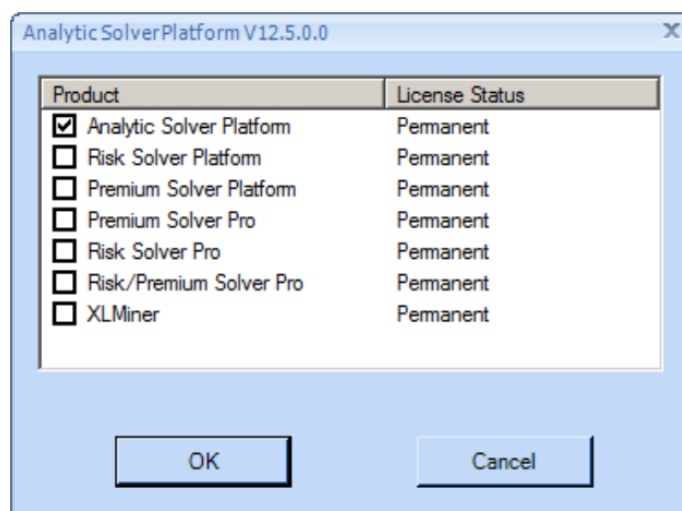


Figura 26 - Seleção plataforma de otimização

No Excel 2010 e 2007, o separador Plataforma Analytic Solver aparece como um add-in sobre o painel de navegação padrão.

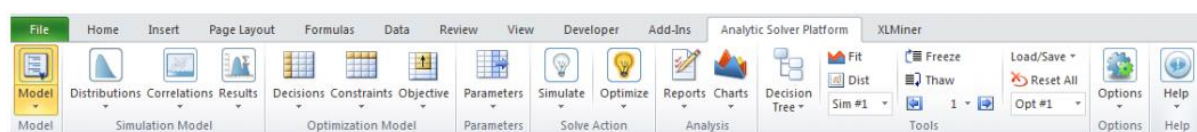


Figura 27 - Painel de navegação Solver Analytic Platform

A pequena seta apontando para baixo, abaixo de cada um dos botões da barra de navegação do *software* Solver Analytic Platform (Figura 27), indica que podemos abrir uma janela suspensa de opções relacionadas com esse botão. Por exemplo, clicando na seta para baixo do botão Restrições, abre-se uma janela de mais opções para definir restrições:

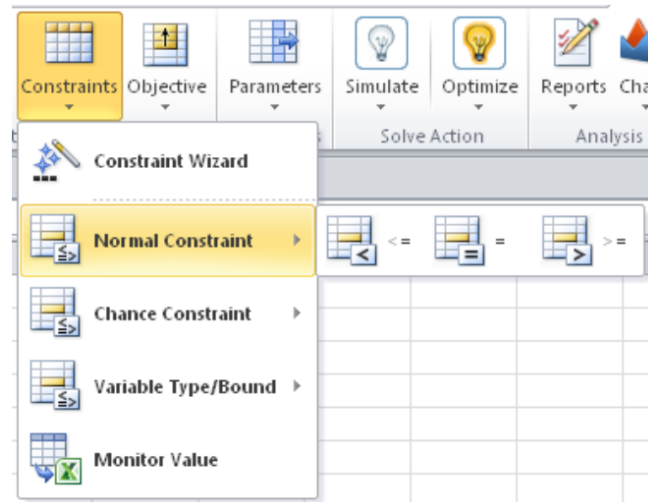


Figura 28 - Janela de opções botão restrições Analytic Solver Platform

Clicando em *Normal Constraint*, (Figura 28) são apresentadas as relações de restrição tradicionais e clicando numa outra janela de escolhas, mostra as suas novas opções que não estão disponíveis no Solver básico do Excel.

Os seguintes botões do painel de navegação apresentam as seguintes possibilidades:

- Clicar no botão Modelo exhibe ou oculta o painel de tarefas.
- O grupo de botões do Modelo de Simulação relacionados à criação de modelos de simulação:
 - Clicar no botão *Distribuição* dá-lhe uma gama de distribuição de probabilidades pré-definidas onde podemos escolher para representar a incerteza a aplicar ao modelo.
 - Clicar no botão *Correlações* abre uma caixa de diálogo que permite facilmente criar, editar ou excluir matrizes de correlação.
 - Clicar no botão *Resultados*, abre uma caixa de diálogo de opções que permitem designar uma célula como uma célula de saída para uma função objetivo (para obter estatísticas, gráficos ou outros resultados da simulação).
- O conjunto de botões do Modelo de Otimização relacionados com a criação de modelos de otimização:

- Clicar no botão *decisões* permite designar uma célula como uma decisão variável, e em otimização estocástica, escolher as decisões normais ou de recurso.
- Clicar no botão *restrições* permite definir facilmente restrições, inclusive limites e restrições de inteiros nas variáveis de decisão.
- Clicar no botão *Objetivo* permite designar uma célula como o objetivo a atingir, e escolher se ela deve ser maximizada ou minimizada.

ANEXO II

O primeiro passo para resolver um modelo de otimização linear com add-in no excel, é o de converter a formulação do problema que queremos solucionar numa folha do Excel, podendo então ser resolvidos por um adequado suplemento solver como IBM ILOG CPLEX para o Microsoft Excel (Figura 30).

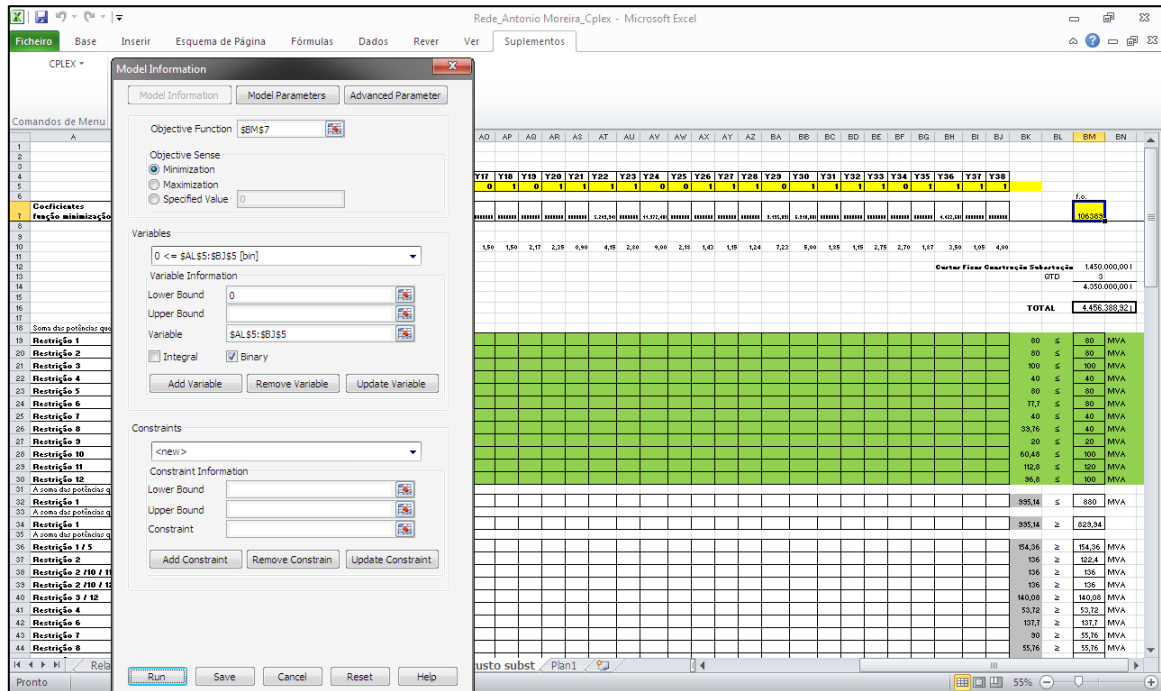


Figura 29 - Aplicação do CPLEX à folha de cálculo

Depois de introduzidos todos os dados numa folha de excel, e de identificados os campos das Variáveis, Função Objetivo e Restrições do respetivo modelo em estudo, o último passo que precisamos de executar antes de colocar o programa a correr, é especificar três tipos adicionais de informações sobre o CPLEX janela **Information Model** (Figura 31).

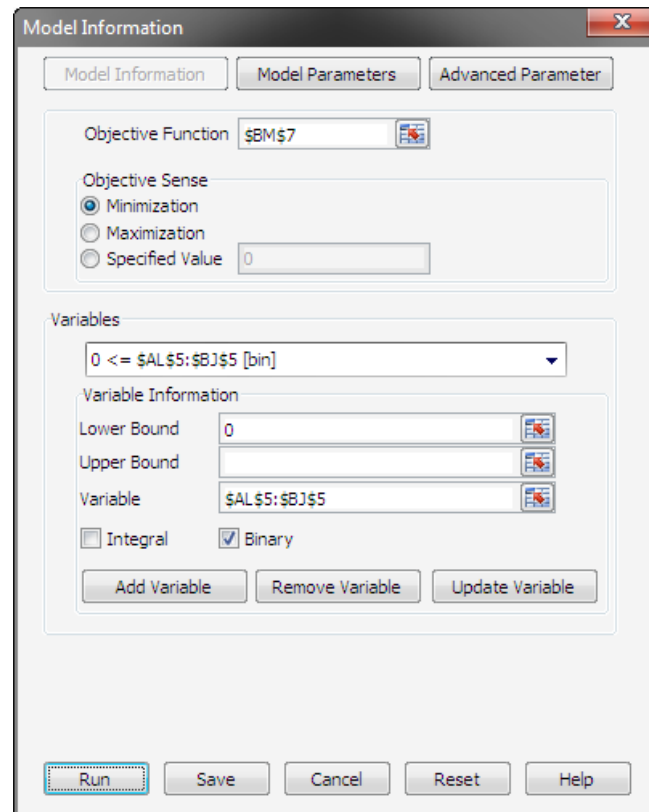


Figura 30 – Information Model CPLEX

Na janela **Information Model** do CPLEX, podemos então:

- Especificar a localização da célula da função objetivo, no campo Função Objetivo.
- Especificar a localização da célula ou intervalo de células usadas como variáveis de decisão para o problema, na seção Variáveis.
- Especificar as limitações a ser utilizados na solução, na secção de restrições.

ANEXO III

SUBESTAÇÕES

Ordem	Instalações	Localização ⁹	Potência Nominal (MVA)	Ponta (MW)
1	SE BELAS	Samba	2x20	32
2	SE BOAVISTA	Sambizanga	2x40	36
3	SE CHICALA	Ingombotas	1x20	19
4	SE CUCA	Cazenga	2x40	84
5	SE EDIFÍCIO SEDE	Sambizanga	1x40	38
6	SE ESTRADA DE CATETE	Rangel	2x20	35
7	SE GOLFE	Kilamba Kiaksi	2x40	75
8	SE MAIANGA	Maianga	2x40+1x20	87
9	SE MÓVEL II	Viana	1x20	0
10	SE MUTAMBA	Ingombotas	2x40	73
11	SE NGOLA KILUANGE	Sambizanga	2x20	26
12	SE NOVA VIDA	Kilamba Kiaksi	2x20	35
13	SE SAPÚ	Viana	1x20	5,4
14	SE TALATONA	Samba	2x20	27
15	SE VIANA VILA	Viana	1x20	19
16	SE ZANGO	Viana	1x20	12
Total			780	528,24

POSTOS DE SECCIONAMENTO

Ordem	Instalações	Localização ¹⁰	N.º de Saídas
1	PS00	Sambizanga/SE Edifício Sede	27
2	PS01	Ingombotas/SE Mutamba	27
3	PS02	Ingombotas	22
4	PS03	Maianga/SE Maianga	27
5	PS04	Ingombotas (Hospital Militar)	15
6	PS05	Rangel/SE Estrada de Catete	22
7	PS06	Cazenga/SE Cuca	27
8	PS07	Cazenga (Siga)	7
9	PS08	Sambizanga	12
10	PS09	Ingombotas (Boavista)	13
11	PS10	Ingombotas	16
12	PS13	Maianga (Aeroporto)	9
13	PS14	Ingombotas (Baleizão)	16
14	PS17	Cazenga	6
15	PS18	Kilamba Kiaksi (Palanca)	11
16	PS20	Ingombotas (Coreia)	10
17	PS21	Cazenga (Condel)	9
18	PS22	Kilamba Kiaksi (Golfe)	11
19	PS23	Kilamba Kiaksi/SE Nova Vida	13
20	PS24	Kilamba Kiaksi/SE Golfe	17
21	PS25	Rangel (Cidadela)	6
22	PS26	Viana/SE Zango	4
23	PS27	Sambizanga/SE Ngola Kiluange	12
24	PS28	Samba/SE Talatona	28
25	PS30	Maianga (Tourada)	0
26	PS31	Cazenga (Sup. Mercado Mabululu)	0
27	PS32	Sambizanga (Boavista)	0
28	PS33	Ingombotas (SODIMO)	0

MANUTENÇÃO DA REDE DE CABOS E INSTALAÇÕES MT

O quadro abaixo expressa os números das visitas efectuadas nos postos de transformação no ano em análise:

Áreas de Execução	Postos de Transformação		Média de Visitas
	Em Serviço	Visitados	
CD Ingombotas	180	323	1,79
CD Maianga	196	76	0,39
CD Sambizanga	87	101	1,16
CD Cazenga	140	172	1,23
CD Kilamba Kiayi	203	13	0,06
CD Viana	312	122	0,39
CD Rangel	79	16	0,20
CD Samba	82	68	0,83
CD Cacucaco	35	99	2,83
CD Bengo	39	10	0,26
Total	1.353	1.000	0,74

PONTAS INDIVIDUAIS DAS ENTRADAS

O quadro abaixo ilustra a variação das pontas mensais das diversas entradas ao longo do ano, onde, como já é tradicional, se verifica que os maiores valores se registam nos meses mais quentes:

Nível de Tensão	Entradas	Pontas Mensais (MW)											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
60 KV	SE CUCA (LIA+LIB+LIJA+LIIB)	160	228	230	230	202	236	192	228	160	140	160	188
	SE GOLFE (LINHA VIANA)	22	25	22	38	20	22	20	38	22	12	14	22
	SE ZANGO	5	4,2	5	5	4,3	5	4,8	8,3	6,3	6,7	9	9,3
	SE N'GOLA KILUANJE	21	21	22	20	18	15	21	22	15	16	15	16
	LINHA DA CAMAMA (SE's TALATONA, N. VIDA e TP II SE GOLFE)	57	84	75	73	75	68	69	75	50	52	50	73
	CT CAZENGA /SE CUCA (GTG's #06 E 07/TP II)	32	38	38	34	35	30	36	29	32	30	32	26
	CENTRAL BOAVISTA	—	—	—	34	32	32	29	—	—	—	—	35
15 KV	SE VIANA EDEL (MOVEL II)	18	19	19	18	19	15	15	12	12	13	16	16
	CT CFL	54	53	52	52	49,7	30	24	29	25	21	22	29
	CT ROCHA PINTO	29	29,8	28,9	28,3	27	25	23	24	25	25	24	25
	CT QUARTÉIS	17	17,1	17,5	16,1	18	15	12,6	15	17	17	18	16

